



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta textilní



INTENZITA VYZAŘOVÁNÍ OPTICKÝCH VLÁKEN

Diplomová práce

Studijní program: N3108 – Průmyslový management
Studijní obor: 3106T014 – Produktový management - Textil

Autor práce: **Bc. Jana Holovková**
Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Dana Křemenáková





TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta textilní



THE LIGHT INTENSITY OF OPTICAL FIBERS

Diploma thesis

Study programme: N3108 – Industrial Management
Study branch: 3106T014 – Product Management - Textile

Author: **Bc. Jana Holovková**
Supervisor: doc. Dr. Ing. Dana Křemenáková



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jana Holovková**
Osobní číslo: **T11000102**
Studijní program: **N3108 Průmyslový management**
Studijní obor: **Produktový management- Textil**
Název tématu: **Intenzita vyzařování optických vláken**
Zadávající katedra: **Katedra hodnocení textilií**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte rešerši na uvedené téma. Zaměřte se na intenzitu vyzařování optického vlákna v napřímeném stavu a v ohybu. Uveďte základní principy a metody měření.
2. Proved'te měření intenzity vyzařování optických vláken různých průměrů v napřímeném stavu. U vybraných optických vláken sledujte intenzitu vyzařování při různém úhlu ohybu vlákna.
3. Stanovte závěry s ohledem na vliv průměru optického vlákna na intenzitu vyzařování v napřímeném stavu. Sledujte také vliv podílu poloměru ohybu a poloměru vlákna na intenzitu vyzařování.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

50 – 60 stran

Forma zpracování diplomové práce:

tištěná/ elektronická

Seznam odborné literatury:

[1] Endruweit, A., Long, A.C., Johnson, M.S.: Textile Composites with embedded optical fibers. Quantification of bending losses in transmitted light intensity using a Monte Carlo Ray-Tracing Metod. 8th International Conference on Textile Composites (TEXCOMP-8), Nottingham, UK, 16-18 Oct 2006.

[2] Křemenáková, D., Meryová, B., Militký, J., Lédl, V.: Illumination Intensity Changes of Side Emitting Polymer Optical Fibers. 19th Conference STRUTEX 2012 Faculty of Textile Engineering Technical University of Liberec Czech rep.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Dana Křemenáková

Katedra materiálového inženýrství

Konzultant diplomové práce:

Ing. Bc. Bára Meryová

Katedra textilních technologií

Datum zadání diplomové práce:

31. října 2012

Termín odevzdání diplomové práce:

6. ledna 2014

Technická univerzita v Liberci

Fakulta textilní

Katedra hodnocení textilií

V Liberci dne 27. 5. 2013

Žádám o prodloužení odevzdání diplomové práce z 27. 5. 2013 na 6. 1. 2014.

Důvod odkladu odevzdání: časová náročnost zpracovávání experimentu diplomové práce.

Děkuji za vyřízení.

Jana Holovková

Vyjádření vedoucího práce

Vyjádření vedoucího katedry

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60- školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mě požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 6.1 2014

Podpis:

Poděkování

Touto cestou bych chtěla poděkovat především vedoucí práce doc. Dr. Ing. Daně Křemenákové, za odborné vedení a cenné rady, které mi poskytla během zpracovávání této práce.

Dále bych chtěla poděkovat konzultantce Ing. Barboře Meryové za připomínky, vstřícnost a ochotu.

Ráda bych také poděkovala své rodině a příteli za důvěru a psychickou podporu během celého studia.

Děkuji Jana Holovková

Anotace

Diplomová práce se zabývá světelnou intenzitou stranově vyzařujících optických vláken v napřímeném stavu a v ohybu. Teoretická část obsahuje charakteristiku, princip a vlastnosti optického vlákna, popis výroby s ohledem na materiál. V experimentální části jsou popsány postupy měření prováděných experimentů. Součástí jsou výsledky měření světelné intenzity napřímených optických vláken v závislosti na vzdálenosti od zdroje světla a jejich shrnutí v diskuzích. Dále jsou uvedeny výsledky měření světelné intenzity optických vláken v ohybu v závislosti na úhlu ohybu a diskuze těchto výsledků. V rámci diplomové práce jsou představeny návrhy odtahového zařízení ke stávajícímu přístroji měřícímu světelnou intenzitu v napřímeném stavu. V závěru práce je celkové vyhodnocení a shrnutí prováděných experimentů.

Klíčová slova

Ohyb optických vláken, optické vlákno, světelná intenzita, útlum.

Annotation

This diploma thesis deals with light intensity of side emitting optical fibers in the straight condition and bend. The theoretical part contains the characteristics, principles and properties of the optical fiber, a description of production with regard to the material. In the experimental part describes the measurement procedures performed experiments. Part contains of the results of measurement of light intensity straight optical fibers, depending on the distance from the light source and summary in the discussion. Further, the measurement results of the light intensity of optical fiber bending in relation to the different angles of bending and discussion of the results. The diploma thesis introduce design towing equipment to an existing device measuring light intensity in the straight condition. At the end of the work is summary and overall evaluation experiment.

Key Words

Bending of optical fibers, optical fiber, light intensity, attenuation.

Obsah

Obsah	9
Seznam symbolů a zkratek.....	11
Úvod	13
1. TEORETICKÁ ČÁST.....	14
1.1 Optická vlákna	14
1.2 Historie optických vláken	15
1.3 Struktura optických vláken.....	16
1.4 Princip šíření signálu (světla) v optickém vlákně.....	17
1.5 Index lomu a Snellův zákon	17
1.6 Výroba optických vláken	18
1.6.1 Výroba pomocí preformy- klasická tavná technologie.....	19
1.6.2 Depozitní technologie- depozice par	19
1.6.3 Výroba pomocí metody dvojitého kelímku	19
1.7 Materiály využívané při výrobě optických vláken	20
1.7.1 Plastová (polymerová) vlákna	20
1.7.2 Skleněná vlákna	21
1.8 Parametry optických vláken	22
1.8.1 Šířka pásma optického vlákna	22
1.8.2 Numerická apertura NA.....	22
1.8.3 Světelná intenzita	23
1.9 Faktory způsobující ztrátu svítivosti.....	23
1.9.1 Útlum světelného signálu optického vlákna	23
1.9.2 Disperze	24
1.9.3 Materiálová absorpce	25
1.9.4 Materiálový rozptyl.....	26
1.9.5 Minimální poloměr ohybu	27
1.9.6 Ohyb vlákna.....	28
1.10 Rozdělení optických vláken	31
1.10.1 Jednovidová optická vlákna SM (Single mode)	31
1.10.2 Mnohovidová optická vlákna MM (Multi mode)	32
1.11 Metody měření světelné intenzity	35

1.11.1 Měření světelné intenzity stranově vyzařujících optických vláken v napřímeném stavu.....	35
1.11.2 Měření světelné intenzity stranově vyzařujících optických vláken v ohybu.....	36
2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	38
2.1 Charakteristika používaných optických vláken.....	38
2.2 Příprava vzorků	39
2.3 Měření světelné intenzity stranově vyzařujících optických vláken v napřímeném stavu.....	40
2.3.1 Vyhodnocení naměřených dat dle metody 1	42
Pracovní délka optického vlákna dle metody 1	44
2.3.2 Vyhodnocení naměřených dat dle metody LLF2	46
2.3.3 Porovnání metody 1 a metody LLF2	50
2.3.4 Vliv průměru vlákna na intenzitu vyzařování.....	53
2.4 Měření světelné intenzity stranově vyzařujících optických vláken v ohybu	56
2.4.1 Vliv podílu průměru vlákna a měřeného kotouče na světelnou intenzitu.....	63
2.4.2 Světelná intenzita v ohybu optických vláken dle metody LLF2	65
3. Vlastní návrh odtahového zařízení.....	69
3.1 Současný stav	69
3.1.1 Varianta 1- Odtah pomocí stávajícího krokového motoru.....	71
3.1.2 Varianta 2- Odtah pomocí navijáku.....	72
3.1.3 Varianta 3- Odtah pomocí řemenice	73
3.1.4 Varianta 4- Odtah pomocí ozubeného kola	74
Závěr	76
Seznam použité literatury	79
Seznam tabulek	82
Seznam obrázků	83
Seznam příloh.....	85

Seznam symbolů a zkratek

c [m/s]	rychlost šíření světla ve vakuu
d [mm]	průměr optického vlákna
D [mm]	průměr kotouče
L [mm]	vzdálenost mezi místy měření výkonů P_1 a P_2
L_p [mm]	pracovní délka optického vlákna
$L_{skut.}$ [mm]	skutečná měřená délka
$l_{skut.}$ [mm]	skutečná délka kroku
n [-]	index lomu
n_1 [-]	index lomu jádra optického vlákna
n_2 [-]	index lomu pláště optického vlákna
n_0 [-]	index lomu okolního prostředí
N [°]	úhel dopadajícího paprsku
N_c [°]	kritický úhel
NA [-]	numerická apertura
P [W]	světelný výkon
P_1 [W]	naměřený výkon světelné intenzity ve vzdálenosti z_1 od zdroje světla
P_2 [W]	výkon světelné intenzity ve vzdálenosti z_2 od zdroje světla
$P(0)$ [W/m ²]	průměrná intenzita vyzařování na vstupu do vlákna
$P(0)_{kor}$ [W/m ²]	korigovaná světelná intenzita na vstupu do vlákna
$P(L)$ [W/m ²]	průměrná hodnota intenzity vyzařování
P_{Lp} [W]	vyzářený výkon na konci pracovní délky
R_b [mm]	poloměr ohybu
R_f [mm]	poloměr vlákna
R_{MM} [μm]	kritický poloměr ohybu pro mnohovidová optická vlákna
R_{SM} [μm]	kritický poloměr ohybu pro jednovidová optická vlákna
T_g [°C]	teplota skelného přechodu
v [m/s]	rychlost šíření světla v dané látce
Φ_c [°]	kritický úhel

$v_{MAX} [^\circ]$	maximální úhel paprsků vstupujících do vlákna
$\lambda [\mu m]$	vlnová délka vyslaného signálu
$\lambda_c [\mu m]$	mezí vlnová délka pro vedení signálu ve vlákne
$\varnothing [mm]$	označení průměru
$\alpha [dB]$	koeficient útlumu
$\alpha_L [dB/mm]$	průměrná rychlost útlumu
$\alpha_L [dB]$	útlum
Al_2O_3	oxid hlinitý
GeO_2	oxid germania
k	směrnice přímky
PC	polykarbonáty
$PMMA$	polymethylmethakrylát
PS	polystyren
q	úsek přímky
R^2	koeficient determinace
S_c	souhrnný reziduální součet čtverců odchylek
SiO_2	oxid křemičitý

Úvod

Optická vlákna se objevují v našem okolí, aniž bychom tuto skutečnost příliš zaregistrovali. Běžně se používají v telekomunikacích pro velmi spolehlivý a rychlý přenos dat na velké vzdálenosti. Stranově vyzařující optická vlákna aplikovaná do plošných textilií si nově našla uplatnění jako aktivní bezpečnostní textilie a výrobky.

Tato práce je zaměřena na stranově vyzařující optická vlákna využívaná v textilním průmyslu. Diplomová práce je rozdělena do tří hlavních částí.

V teoretické části je vysvětlován pojem optické vlákno, jeho popis, struktura a princip šíření světla. Dále jsou zde uvedeny nejdůležitější vlastnosti charakteristické pro optická vlákna, jak se tato vlákna vyrábějí a z jakých materiálů. Závěr teoretické části je zaměřen na princip měření světelné intenzity vyzařování optických vláken.

Experimentální část se věnuje měření světelné intenzity optických vláken v napřímeném stavu a v ohybu. Jsou zde využívány dvě metody vyhodnocování experimentálních dat a porovnávány vzájemně mezi sebou. Každé experimentální měření má uvedené podmínky měření a diskuze naměřených výsledků.

Poslední část diplomové práce je zaměřena na vlastní návrh odtahového zařízení k přístroji měřícímu světelnou intenzitu optických vláken v napřímeném stavu. Je zde představeno několik variant návrhu odtahového zařízení, jejich vyhodnocení a následné doporučení nejvhodnější varianty.

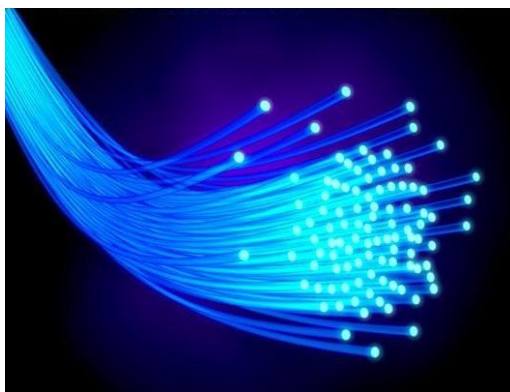
Získané poznatky a výsledky realizovaných experimentů jsou shrnuty v celkovém závěru diplomové práce.

1. TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Optická vlákna

Optická vlákna jsou polymerní a skleněná vlákna, která přenášejí světelné nebo infračervené záření podél své osy. Záření se šíří vnitřkem vlákna, jednotlivé paprsky světla se odrážejí od vnitřních stěn vlákna, nebo se ohýbají v okrajových vrstvách. Dříve se místo optických vláken používaly kovové vodiče, u nichž docházelo k elektromagnetickému rušení a vysokým přenosovým ztrátám. Další výhodou optických vláken oproti kovovým vodičům je, že jsou mnohem lehčí, ohebnější a vyrábějí se v menších průměrech.

Nejčastěji se optická vlákna používají v komunikacích, kde umožňují přenos na velké vzdálenosti. Dále se využívají jako snímače, vlákenné lasery a pro osvětlování.



Obr. 1: Optická vlákna [27]

Optické vlákno je dielektrický válečkový vlnovod, který přenáší světlo (signál) podél své osy úplným vnitřním odrazem na rozhraní dvou materiálů (prostředí) s rozdílným indexem lomu. Optické vlákno je složeno z jádra, s indexem lomu n_1 a pláště s indexem lomu n_2 . Jádro je obklopeno pláštěm, a aby došlo k přenosu světla, musí být zachována podmínka $n_1 > n_2$. Tj. index lomu jádra n_1 musí být vždy vyšší (minimálně o 1%), než je index lomu pláště n_2 . [1]

1.2 Historie optických vláken

Optická vlákna se využívají v různých odvětvích pro přenos světla na určitou vzdálenost. V následujících datech je zachycen vývoj přenosu světla od lehkých skleněných trubek až po známá optická vlákna.

- **1854- John Tyndall- Anglie**

Světlo bylo přenášeno prostřednictvím proudu vody, která vytékala z nádoby osvětlené lampou.

- **1880- William Wheeler- USA**

Pomocí elektrické obloukové lampy umístěné v suterénu domu osvětlil celý dům- světlo bylo vedeno systémem rozvedených lehkých trubek odrazem.

- **1888- Roth a Reuss- Rakousko**

Lékaři použili ohnuté skleněné tyčinky pro osvětlení tělních dutin.

- **1898- David Smith- USA**

Zahnutá skleněná tyč použita jako chirurgická lampa.

- **1920- John Logie Baird- Anglie, Clarence W. Hansell- USA**

Použití průhledných tyčí k přenosu obrazu, např. pro televizi.

- **1954- Abraham Van Heel- Holandsko**

Poprvé byla představena optická vlákna s transparentním pláštěm, který výrazně omezoval ztráty přenášeného signálu. Tato vlákna se využívala pro přenos signálu na krátké vzdálenosti, konkrétně pro přenos analogového obrazu. (Měrný útlum optických vláken se pohyboval okolo 1000dB/km).

- **1961- Elias Snitzer- USA**

Jako první přichází s teorií jednovíkových optických vláken. Ukázal, že přenos signálu lze realizovat i pomocí optických vláken malých průměrů (v řádech mm).

- **1970- Rober Maurer, Donald Keck, Peter Schultz- USA**

Ve firmě Corning Glass Works bylo vyrobeno první jednovidové optické vlákno s měrným útlumem pod 20dB/km. Jádrem bylo vyrobeno z křemičitého skla (SiO_2) s příměsí titanu, pomocí kterého se dosáhlo nižšího měrného útlumu (cca 17dB/km). Roku 1972 bylo ve stejné firmě, stejným týmem vyrobeno mnohovidové optické vlákno s měrným útlumem 4dB/km, jádrem bylo vyrobeno z křemičitého skla (SiO_2) obohaceného o oxid z germania (GeO_2).

- **1975- USA**

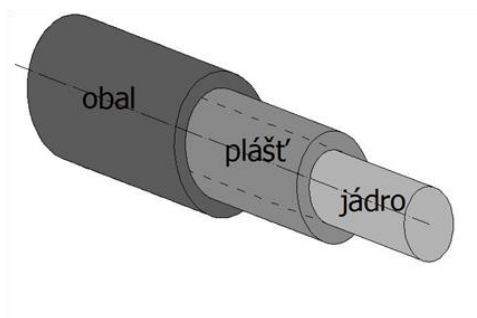
Vláda se rozhodla propojit počítače (ve své centrále NORAD) pomocí optických vláken. [2], [14]

1.3 Struktura optických vláken

Světlo (signál) prochází vnitřní vrstvou (jádre) optického vlákna a dále se odráží od další vrstvy (pláště) a udržuje se ve vnitřní vrstvě.

Optické vlákno je složeno z:

- jádra- jedná se o vnitřní vrstvu kde dochází k vlastnímu přenosu světla;
- pláště- střední vrstva, která zajišťuje správnou funkci vlákna;
- ochranné vrchní vrstvy- chrání optické vlákno před poškozením, obvykle bývají vyrobeny z plastu. [1]



Obr. 2: Složení optického vlákna [1]

1.4 Princip šíření signálu (světla) v optickém vlákne

Pro vysvětlení způsobu šíření signálu v optickém vlákne existují dvě metody:

- Geometrická optika- optické záření je ve formě paprsků (vidů) s uplatněním principu odrazu a lomu. Konkrétně lze princip šíření signálu vysvětlit pomocí Snellova zákona.
- Elektromagnetická teorie šíření- je založena na znalostech a řešení Maxwellových rovnic.

Pro další vysvětlení optických vláken a jejich vlastností bude použito metody geometrické optiky.[9], [14]

1.5 Index lomu a Snellův zákon

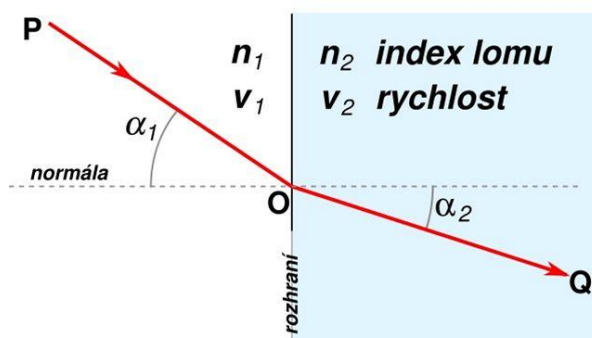
Index lomu n je bezrozměrná fyzikální veličina, která vyjadřuje, jak se změní rychlost šíření světla při přechodu mezi různými prostředími. U čirých a průhledných látek lze index lomu považovat za konstantu, která se vztahuje k celému rozsahu viditelného světla. Index lomu světla je podílem rychlosti světla ve vakuu k rychlosti světla v hmotném prostředí, dle uvedené rovnice (1). Jedná se o tzv. absolutní index lomu.

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

c ...rychlost šíření světla ve vakuu (299 792 458 m/s);

v ...rychlost šíření světla v dané látce [m/s].

Plášť optického vlákna má hodnotu indexu lomu 1,46. Jádru optického vlákna má hodnotu 1,48. Vyšší hodnota indexu lomu znamená, že se světlo v daném prostředí pohybuje pomaleji.



Obr. 3: Snellův zákon [28]

n_1 ...index lomu jádra optického vlákna

n_2 ...index lomu pláště optického vlákna

Paprsek (vid) dopadající na rozmezí dvou prostředí, kdy každé z nich má rozdílný index lomu a disponují odlišnými vlastnostmi, se v závislosti na úhlu dopadu odrazí a vrátí zpět do primárního prostředí, nebo pronikne do druhého prostředí. [1], [3], [4]

1.6 Výroba optických vláken

V současnosti se na trhu objevují optická vlákna vyráběná ze skla, nebo z polymeru. Skleněná vlákna jsou vyrobena z křemíku, plastová vlákna z polymethylmethakrylátu. Při výrobě optických vláken je největší důraz kladen na čistotu, která ovlivňuje výslednou kvalitu přenosu signálu. Důležitá je také možnost výroby širokého profilu indexu lomů a rozměrů. Optická vlákna se nejčastěji vyrábí pomocí preformy, nebo metody dvojitého kelímku.

1.6.1 Výroba pomocí preformy- klasická tavná technologie

Optická vlákna se vyrábějí z tzv. preformy, která má tvar trubice a je vyrobena ze skla požadovaných vlastností. Velikost preformy určuje výslednou délku optického vlákna (čím je preforma větší, tím je delší vlákno). Nejprve se připraví ultračistý prášek skloviny (např. oxidu křemičitého SiO_2 , GeO_2 , nebo Al_2O_3 , aj.). Z připraveného prášku se pomocí nízkoteplotního tavení ($900\text{--}1300^\circ\text{C}$) v platinovém kelímku vytvoří tavenina bez bublin, zároveň zde dochází ke změně indexu lomu díky změně složení a iontové výměně. Aby nedocházelo k znečištění skloviny, využívá se indukčního ohřevu (viz. obr. č. 4). Následně se tavenina zbavuje OH iontů probubláváním vysoušecího plynu a odlévá se do tzv. preformy, z které se táhne vlákno. Preforma má tvar trubice, je vyrobena ze skla a bývá zavěšena do dávkovacího mechanismu v horní části stroje. Zařízení je položeno ve velkých výškách, aby se tažené vlákno neohýbalo. Ze zahřáté preformy se utvoří kapka, která za sebou táhne vlákno. Poté se kapka ochladí a odlomí. Vlákno se navede do stroje a tím začíná proces tažení. Vlákno je pevně a přesně uchyceno pomocí soustavy kladek. Na závěr procesu se vlákno, které již získává své přesně požadované parametry, navíjí na cívku. Tyto stroje jsou náročné z hlediska prostoru, vzdálenost od začátku po konec tažení může měřit až několik desítek metrů. [3], [5], [6]

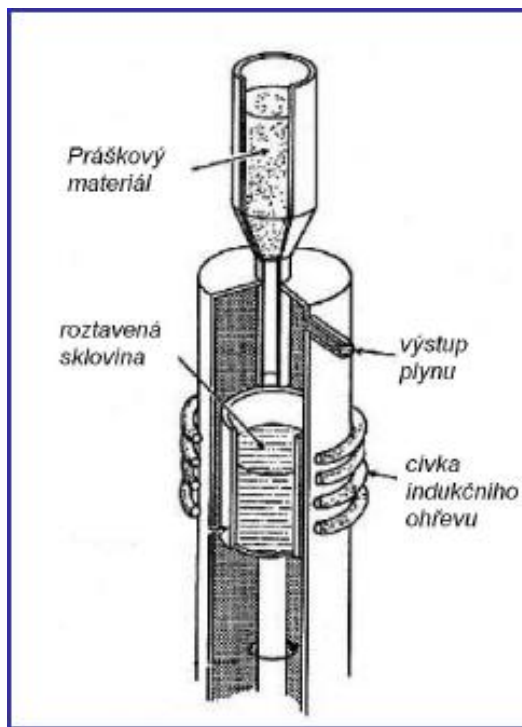
1.6.2 Depozitní technologie- depozice par

Jedná se o technologii, při které se využívá principu destilace. Spočívá v tom, že sklo se odpaří a následně se ve formě skelných par usazuje na „kondenzační destičce“, kde již dosahuje dokonalé čistoty.

1.6.3 Výroba pomocí metody dvojitého kelímku

Optické vlákno je vyráběno prostřednictvím dvojitého kelímku. Ve vnitřním kelímku je roztavený materiál jádra a ve vnějším kelímku je připravený materiál pláště optického vlákna. Dostatečným přidáváním tavenin do kelímků lze vyrábět optická vlákna libovolné délky i s gradientním průběhem indexu lomu. Rychlost tažení vlákna

a teplota, která je těsně za hrotem obou kelímků, ovlivňuje výsledné geometrické rozměry optického vlákna. [11]



Obr. 4: Princip indukčního ohřevu [29]

1.7 Materiály využívané při výrobě optických vláken

Nejpoužívanějšími materiály pro výrobu optických vláken jsou sklo a plasty, případně jejich kombinace.

1.7.1 Plastová (polymerová) vlákna

Plastová optická vlákna se nejčastěji vyrábí z polymethylmethakrylátu, polykarbonátu, nebo polystyrenu.

Polymethylmethakrylát (PMMA)

Polymethylmethakrylát je syntetický polymer, známější pod názvem plexisklo. Jeho charakteristickým znakem je vysoká transparentnost, a s tím

související i propustnost světla, která dosahuje až 92%. Polymethylmethakrylát vykazuje také vysokou odolnost vůči povětrnostním podmínkám a vodě. Index lomu je 1,492 a teplota zesklenní (T_g) je v rozmezí 95-125°C. [12]

Polykarbonát (PC)

Polykarbonát se vykazuje vysokou tepelnou i mechanickou odolností a dobrými optickými vlastnostmi. Index lomu je 1,586 a teplota zesklenní (T_g) je 150°C. [12]

Polystyren (PS)

Polystyren disponuje dobrou odolností vůči kyselinám i zásadám. Jedná se o tvrdý, ale zároveň křehký transparentní plast s indexem lomu 1,59 a teplotou zesklenní (T_g) 95°C. [13]

Polymethylmethakrylát, polykarbonát i polystyren patří mezi termoplastické plasty neboli termoplasty. Termoplasty jsou charakteristické tím, že při určité teplotě přecházejí do plastického až tekutého tvaru, po ochlazení se opět zpevní. Pomocí změny teploty lze tyto transformace provádět opakovaně. [12]

1.7.2 Skleněná vlákna

Skleněná optická vlákna se vyrábí z křemenného skla, což je čistý oxid křemičitý (SiO_2) ve skelném stavu. Křemenné sklo je konkrétně využíváno jako jádro optických vláken. Jádro však musí mít vyšší index lomu, než plášť vlákna a samotné křemenné sklo tuto podmínku nesplňuje, protože má index lomu pouze 1,444. Proto se ke křemennému sklu přidává germaniové sklo (GeO_2), které má vyšší index lomu. [1]

1.8 Parametry optických vláken

Základní parametry optického vlákna:

- šířka pásma;
- numerická apertura;
- světelná intenzita.

1.8.1 Šířka pásma optického vlákna

Popisuje nejvyšší kmitočet signálu, který může být spolehlivě přenesen na vzdálenost 1 km mnohovodovým vláknem, aniž by působením disperze příliš zkreslil přenášený signál. Šířka pásma je závislá na mnoha faktorech. Mezi nejdůležitější patří konstrukční uspořádání optického vlákna, zvolený materiál a vlnová délka vyslaného signálu. U stranově vyzařujících optických vláken dosahuje šířka pásma velmi malých hodnot. [1]

1.8.2 Numerická apertura NA

Udává největší úhel, pod kterým světelný paprsek vstupuje do optického vlákna. Číselně je numerická apertura rovna sinu maximálního úhlu v_{MAX} , pod kterým se paprsky vstupující do vlákna budou šířit od začátku až ke konci vlákna. Paprsky dopadající pod větším úhlem se vláknem šířit nebudou. Pro vedení paprsku optickým vláknem musí dojít k úplnému odrazu paprsku na rozmezí jádra s indexem lomu n_1 a pláště s indexem lomu n_2 . Pokud paprsky dopadají pod větším úhlem než je úhel maximální, dochází na rozhraní jádro-plášť k lomu, to způsobí, že se paprsky neodrazí, projdou do pláště a následně i mimo vlákno.

Numerická apertura NA je vyjádřena vztahem:

$$NA = \sin v_{MAX} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} [-] \quad (2)$$

v_{MAX} ...maximální úhel

n_1 ...index lomu jádra optického vlákna;

n_2 ...index lomu pláště optického vlákna. [1]

1.8.3 Světelná intenzita

Světelná intenzita udává světelnou energii, která dopadá na jednotku délky (nejčastěji na m^2). Jedná se o fotometrickou veličinu, která se vyjadřuje podílem světelného výkonu [W] a plochy [m^2], dle rovnice: [21]

$$I = \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3)$$

1.9 Faktory způsobující ztrátu svítivosti

Se zvyšující se vzdáleností od zdroje světla se snižuje světelná intenzita vyzařování optického vlákna. Ke světelným ztrátám dochází často vlivem nečistot, vad a geometrickým nedokonalostem vláken. Nejvíce je vyzařování světelné intenzity ovlivněno následujícími faktory.

1.9.1 Útlum světelného signálu optického vlákna

Útlum světelného signálu v optickém vláknu vyjadřuje výkon signálu, který se zvyšující se vzdáleností od zdroje světla postupně klesá. Útlum představuje měřítko ztráty optické energie ve vlákne a udává se v dB. Je to poměr vstupního světelného výkonu P se vzdáleností od zdroje světla podél osy, dle uvedeného vztahu:

$$P_2 = P_1 \cdot 10^{-\alpha_L \cdot \frac{L}{10}} [W] \quad (4)$$

P_2 ...výkon světelné intenzity ve vzdálenosti z od zdroje světla;

P_1 ...naměřený výkon světelné intenzity na začátku vlákna (tj. u zdroje světla);

α_L ...průměrná rychlost útlumu;

L ...vzdálenost mezi místy měření výkonů P_1 a P_2 .

Průměrná rychlost útlumu α_L je vztažena na 1km délky optického vlákna a udává se v dB/km. Z předchozí rovnice lze odvodit vztahem:

$$\alpha_L = \frac{\alpha}{L} = \frac{10}{L} \cdot \log \frac{P_1}{P_2} \text{ [dB/km]} \quad (5)$$

α ...koeficient útlumu.

Koeficient útlumu α je definován v decibelech, decibel [dB] je logaritmickým měřítkem poměru dvou výkonů P_1 a P_2 , jak je patrné z následující rovnice: [1], [3], [7]

$$\alpha = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2} \text{ [dB]} \quad (6)$$

Pracovní délka vlákna L_p vyjadřuje délku do které lze vlákno ještě reálně použít. Pracovní délku vypočítáme pomocí předchozí rovnice č. 7: [18]

$$L_p = \frac{10}{\alpha_L} \cdot \log \left(\frac{P_1}{P_{Lp}} \right) \text{ [mm]} \quad (7)$$

P_{Lp} ...vyzařený výkon na konci pracovní délky [W]

1.9.2 Disperze

Jedná se o optický jev, při kterém dochází k rozkladu bílého světla na barevné složky. U optických vláken disperze ovlivňuje zejména přenosové vlastnosti v závislosti na přenosové rychlosti. Rozlišujeme 4 základní druhy disperze:

- **Materiálová disperze**

Materiálová disperze je tvořena vlastnostmi samotného materiálu optického vlákna. Lze vyjádřit jako závislost indexu lomu daného materiálu na jeho vlnové délce.

Materiálová disperze je dána již při výrobě optických vláken, proto nelze příliš ovlivnit, pouze vhodným výběrem materiálu. [16]

- **Vidová disperze**

Uplatňuje se v mnohovidových vláknech, kde každý paprsek dorazí na konec vlákna díky rozdílnosti délek drah v rozdílných časových úsecích. Od vstupního impulsu se impuls získaný z jednotlivých paprsků liší tvarem i amplitudou. Vidová disperze se projevuje u dlouhých vláken při přenosu signálu na delší vzdálenost a zároveň omezuje počet impulsů, které mohou být za určitý časový úsek vyslány. [1], [5]

- **Chromatická disperze**

Chromatická disperze je závislá na šířce spektra vlnových délek. Každá část tohoto spektra má ve vlákne jinou rychlost šíření a při změně vlnové délky se mění i index lomu. Proto jednotlivé části spektra dorazí na konec vlákna v jiném časovém okamžiku. [1]

- **Vlnovodná disperze**

Vlnovodná disperze je způsobena změnou geometrie paprsku a rychlosti jeho šíření. Vlnovodná disperze dosahuje vždy záporných hodnot. [17]

1.9.3 Materiálová absorpce

Prezentuje ztráty vyslaného signálu (světla), které souvisí s materiálem optických vláken a jejich výrobou. Princip materiálové absorpce spočívá v přeměně vyslaného signálu (světla) na teplo. Tato transformace signálu (světla) vede ke snížení míry vyzařování optického vlákna.

Rozlišujeme dva druhy materiálové absorpce:

Vlastní absorpce- je způsobena pohlcením části procházejícího světla vlastními molekulami optického materiálu, např. SiO_2 , nebo PMMA. Ztráty absorpcí jsou velmi malé, nedají se odstranit, ale alespoň částečně se s nimi dá manipulovat. [10]

Nevlastní absorpce- je způsobena pohlcením části procházejícího světla molekulami nečistot. Za tyto nečistoty se považuje např. prach, či drobné částice, které vznikly při výrobě, nebo vodní páry (při žhání zůstávají ve vlákně ionty hydroxylu OH^-). Ve skle způsobují příměsi OH iontu mikrotrhliny, proto jsou skleněné materiály náchylnější k praskání. [8]

1.9.4 Materiálový rozptyl

Ztráty způsobené materiálovým rozptylem vznikají již při výrobě.

Lineární materiálový rozptyl

Jedná se o lineární přechod části vyslaného signálu (světla) obsaženého v jednom vidu do nového vidu.

Definice rozptylu dle Rayleighna

Dominující jev v optické komunikaci. Vzniká při tepelných kmitech v krystalické mřížce. U tzv. Rayleighova rozptylu se paprsky po dopadu na náhodné nestejnorodé atomové struktury roztříští do všech stran, to následně vede ke snížení světelného výkonu. Tento jev je prakticky přítomen vždy, a nelze odstranit ani samotnou výrobou optických vláken. Dokonce ani podchlazením optických vláken na absolutní nulu, protože poté dochází k zamrznutí jednotlivých atomů a vyslaný signál (světlo) se okolo nich ohýbá, tím tedy dochází ke ztrátě svítivosti rozptylem.

Definice rozptylu dle Mie

Vzniká nepravidelností válcové struktury optického vlákna, jako je např. vnitřní pnutí ve vlákně, kolísání průměru jádra, nebo mikroskopickými

bublinami. Pokud tyto geometrické nepravidelnosti optického vlákna překročí $1/10$ vlnové délky, tak se rozptyl významně zvyšuje, což opět vede ke ztrátě svítivosti. Mie rozptyl lze na rozdíl od předchozího rozptylu alespoň částečně minimalizovat odstraněním nepravidelností již při výrobě a s tím i související zdokonalení výrobního procesu optického vlákna přesným tažením vlákna a nanášením dalších vrstev a ochran na vlákno.

Nelineární materiálový rozptyl

Hlavním rozdílem nelineárního rozptylu oproti lineárnímu je, že výstupní signál (světlo) není přímo úměrný vstupnímu výkonu. U nelineárního neboli neelastického rozptylu mají rozptýlená a dopadající vlna každá jinou frekvenci.

Nelineární rozptyl Brillouin

Vzniká vzájemných působením akustických vln ve světlovodu. Dochází k frekvenčnímu posuvu pouze ve zpětném směru.

Nelineární rozptyl Raman

Vzniká vzájemným působením světelné vlny s kmity molekul světlovaného materiálu. K frekvenčním posuvům dochází v obou směrech, tedy v dopředném i zpětném směru.

Z nelineárních rozptylů se nejčastěji objevují právě zmíněné rozptyly dle Brillouina a Ramana. Existuje také stimulovaný rozptyl, kde se frekvence posouvá pouze v dopředném směru, a rozptyl čtvrtvlnným směřováním. [1], [8], [9], [10]

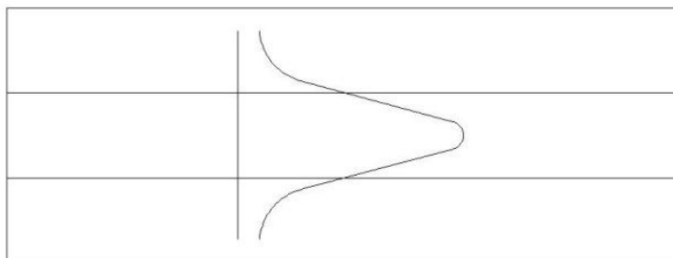
1.9.5 Minimální poloměr ohybu

Minimální poloměr ohybu vlákna je nejmenší ohyb, který je možné použít při instalaci vlákna. Závisí na průměru optického vlákna a použitém materiálu pro výrobu vlákna. Minimální poloměr ohybu se zvyšuje se zvětšujícím se průměrem vlákna.

Plastová vlákna v porovnání se skleněnými vlákny stejného průměru mají zpravidla menší minimální poloměr ohybu. [1]

1.9.6 Ohyb vlákna

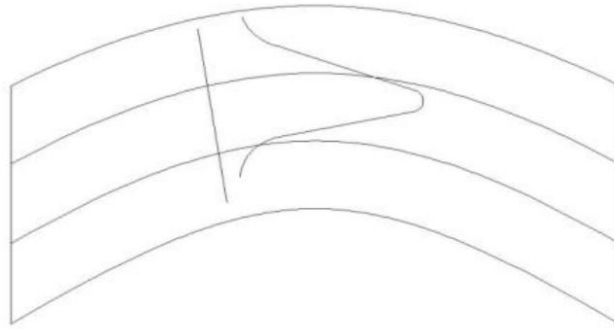
Při ohýbání optického vlákna se mění úhel dopadu a následného odrazu přenášených paprsků. Pokud některý paprsek překročí mezní hodnotu úhlu odrazu, tak se nevrátí zpět do jádra, ale pronikne skrz plášť mimo optické vlákno. To způsobí, že na výstupu vlákna bude méně paprsků, než kolik jich bylo na vstupu optického vlákna. Ohyb vláken vede ke zvyšování útlumu a zároveň jsou vlákna při ohybu náchylnější k mechanickému poškození.



Obr. 5: Vid v napřímeném optickém vlákně [22]

Ztráty způsobené makroohyby

Makroohyby jsou způsobeny vlastním ohybem optického vlákna, tj. ohyb je větší než poloměr vlákna. Ke ztrátě signálu dochází na vnější straně ohybu v plášti vlákna. Část paprsku se nemůže šířit rychleji než je rychlost světla, proto není splněna podmínka kolmosti paprsku na směr šíření. Poloměr křivosti se pohybuje u makroohybů v jednotkách až desítkách milimetrů. Ztrátám, které vznikají makroohyby lze předcházet tím, že se vlákno bude ohýbat s největším poloměrem.



Obr. 6: Vid v ohnutém optickém vlákně [22]

Ztráty způsobené makroohyby lze částečně snížit návrhem vlákna s velkou hodnotou relativní změny indexu lomu, nebo pracovat s vláknem při nižších vlnových délkách. Ztráty výkonu makroohyby se nejvíce začnou projevovat při kritickém poloměru ohybu. Výpočet kritického poloměru ohybu je znázorněn v následujících rovnicích, které jsou odvozeny ze základů geometrické optiky. Rovnice vychází, pokud dochází k porušení úplného odrazu na rozhraní jádra a pláště.

Pro mnohovidová vlákna:

$$R_{MM} = \frac{3 \cdot n_1^2 \cdot \lambda}{4 \cdot \pi \cdot (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{3}{2}}} [\mu m] \quad (8)$$

Pro jednovidová optická vlákna:

$$R_{SM} = \frac{20 \cdot \lambda}{(n_1 - n_2)^{\frac{3}{2}}} * \left(2,748 - 0,996 * \frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^{-3} [\mu m] \quad (9)$$

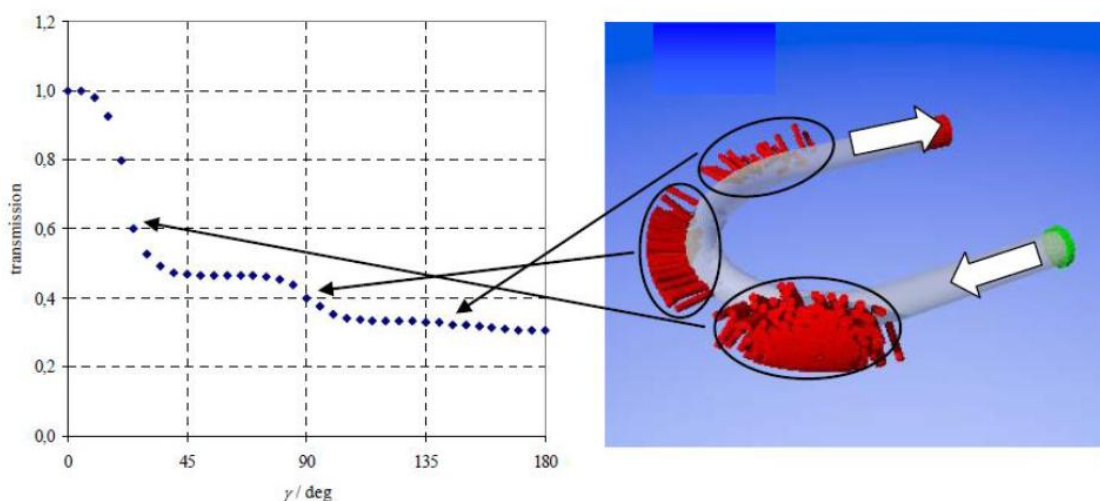
n_1 ...index lomu jádra optického vlákna,

n_2 ...index lomu pláště optického vlákna,

λ ...vlnová délka vyslaného signálu,

λ_c ...mezní vlnová délka signálu pro vedení ve vlákně.

Na následujícím obr. 7 je znázorněn výsledek simulačního experimentu pro stranově vyzařující optická vlákna s poloměrem $R_f = 0,5$ mm při ohybu o poloměru $R_b = 4$ mm. Kritický úhel je zvolen $N_c = 70^\circ$. Přenos světla je v grafu vyobrazen jako funkce ohybu optického vlákna γ . Tato křivka je porovnávána se zobrazením světelných paprsků, které vyzařují z ohnutého vlákna.

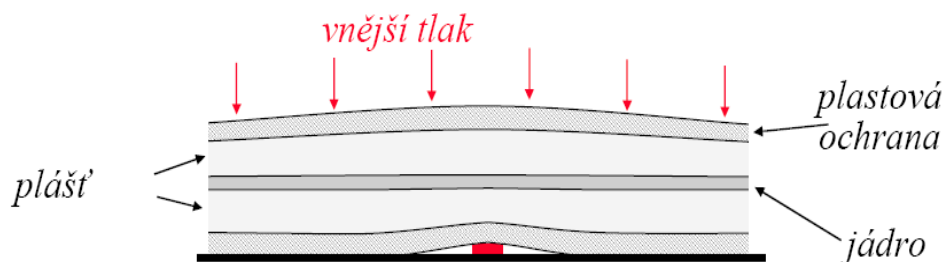


Obr. 7: Přenos světla v závislosti na úhlu ohybu vlákna, poloměr ohybu 4 mm [18]

Červené válečky v obr. 7 zastupují intenzitu signálu vystupující ven z povrchu vlákna. Z obrázku je patrné, že k největší ztrátě dochází v úseku, kde přechází přímý úsek vlákna na ohnutý. Tyto ztráty dosahují až 55%. V dalších úsecích dosahují ztráty 12 % a 3 %.

Ztráty způsobené mikroohyby

Vznikají kvůli drobným nedokonalostem v geometrii optického vlákna, které poté vedou k přenášení energie mezi sousedními paprsky. Mikroohyby jsou zapříčiněny také působením vnějšího tlaku, který deformuje plášť vlákna, jak je patrné z následujícího obrázku č. 8.



Obr. 8: Ztráty způsobené mikroohmy [10]

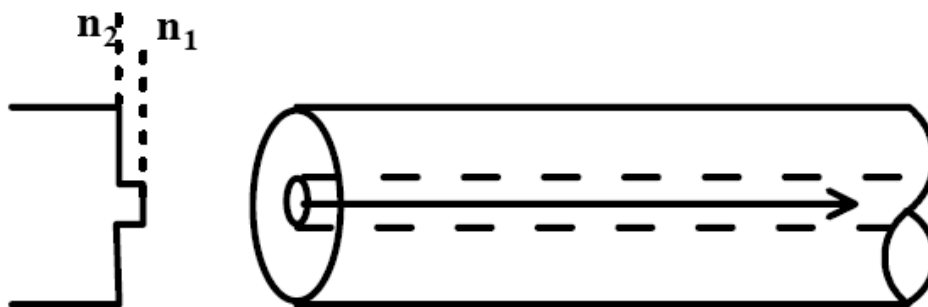
Jako u makroohybů, tak i ztráty způsobené mikroohyby lze částečně minimalizovat. Např. nezatěžovat vlákno nepravidelným tlakem, nebo navrhnout vlákno s odpovídající ochranou před vnějším namáháním a podmínkami. [1], [8], [9], [10], [18], [19], [20], [25]

1.10 Rozdělení optických vláken

Optická vlákna se skleněným, nebo plastovým jádrem můžeme dle způsobu přenosu světelných paprsků (vidů) rozdělit na jednovidová a mnohovidová optická vlákna.

1.10.1 Jednovidová optická vlákna SM (Single mode)

Vláknem se šíří pouze jeden paprsek a to ve směru své osy bez odrazů. Této schopnosti je dosahováno malým průměrem jádra a malým poměrem indexu lomu jádra a pláště. Průměr jádra se pohybuje v rozmezí 4- 10 μ m. Správné zvolení průměru je závislé na přenášené vlnové délce světelného paprsku. Jednovidová optická vlákna disponují vysokou rychlostí přenosu, proto se využívají v telekomunikacích, kde umožňují přenos informací na velkou vzdálenost. Nejpoužívanějším materiálem pro výrobu jednovidových optických vláken je sklo, někdy i s dalšími příměsemi.



Obr. 9: Jednovidové optické vlákno [8]

Vlastnosti jednovidových optických vláken:

- velká šířka pásma;
- malý útlum;
- nevykazují vidovou disperzi
- schopnost přenášet velký objem informací na (až 100krát) větší vzdálenost než u mnohovidových vláken;
- malá hodnota numerické apertury
- jako světelný zdroj lze použít laserové diody.

1.10.2 Mnohovidová optická vlákna MM (Multi mode)

Vláknem se může šířit najednou několik paprsků. Oproti jednovidovým optickým vláknům má výrazně vyšší průměr jádra, v rozmezí 50- 200 μ m. Výhodou mnohovidových vláken je díky větším průměrům nižší výrobní cena, jednodušší manipulace při spojování vláken a připojování světelného zdroje. Nejčastěji používaným materiálem pro výrobu mnohovidových optických vláken je sklo, nebo plast.

Vlastnosti mnohovidových optických vláken:

- větší útlum;
- jednodušší navazování vlákna ke zdroji světla
- vidová disperze (snížení přenosové rychlosti)
- vyšší hodnota numerické apertury
- jako zdroj světla lze kromě laserové diody použít i LED diody;

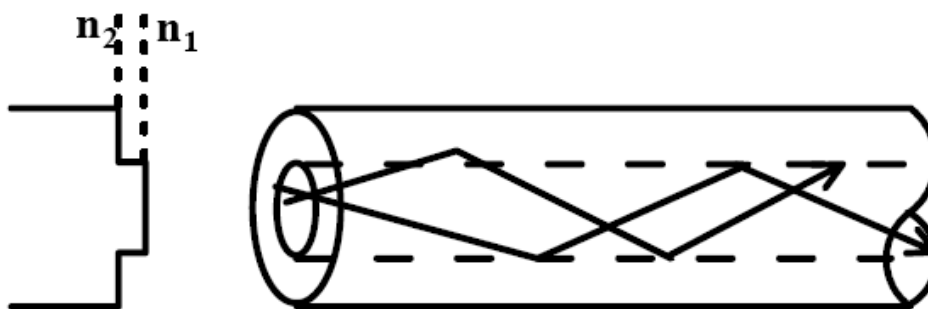
- nižší cena.

Mnohovidová optická vlákna můžeme rozlišit podle toho, jak vedou paprsek a jak se mění optické vlastnosti (tzv. index lomu) na přechodu mezi jádrem a pláštěm, na vlákna:

- se skokovou změnou indexu lomu
- s gradientní (postupnou) změnou indexu lomu.

1.10.2.1 Mnohovidová optická vlákna se skokovou změnou indexu lomu

Tato vlákna vedou více paprsků najednou za využití absolutního odrazu. Jádro má index lomu o konstantní velikosti n_1 a plášť o konstantní velikosti indexu lomu n_2 , díky tomu dochází na rozhraní obou prostředí k ostrému lomu, jak je vyznačeno na obr. 10. Z obrázku je patrné, že jednotlivé paprsky vstupují do vlákna pod různými úhly a dále se vláknem šíří odlišnými drahami. Vzhledem k rozdílnosti drah nemohou na konec vlákna dorazit jednotlivé paprsky najednou ve stejný časový okamžik, dorazí postupně. Tento jev je nazýván disperze. Proto se tato vlákna využívají zejména pro přenos na kratší vzdálenosti. Jádra, mnohovidových optických vláken se skokovou změnou indexu lomu, mají průměr v rozmezí od $50\mu\text{m}$ - $2000\mu\text{m}$.

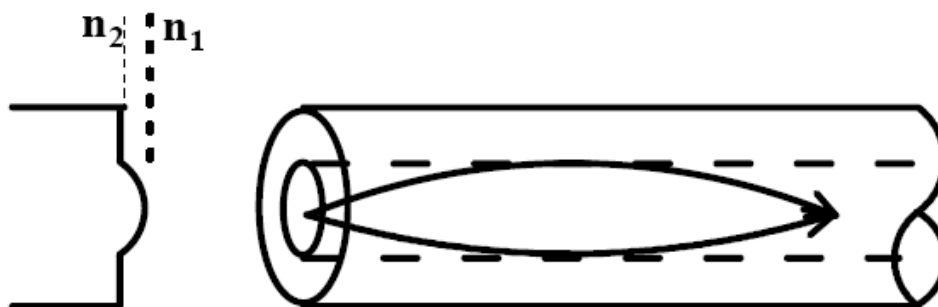


Obr. 10: Mnohovidové optické vlákno se skokovou změnou indexu lomu [8]

1.10.2.2 Mnohovidová optická vlákna s gradientní (postupnou) změnou indexu lomu

Jedná se o vlákna, která opět vedou současně více paprsků, avšak s plynulou změnou drah. Optické záření se v prostředí s nižším indexem lomu šíří daleko rychleji, než v prostředí s vyšším indexem lomu. Proto tedy paprsky, které se šíří blíže u pláště

vlákna, kde je index lomu nižší, mají vyšší rychlost a celková doba jejich šíření vláken na velké vzdálenosti je podobná době šíření přímého paprsku, který prochází středem jádra, kde index lomu dosahuje nejvyšších hodnot. Oproti vlákně se skokovou změnou indexu lomu pro danou vlnovou délku, dochází k zásadnímu snížení disperze. Mnohovidová optická vlákna s gradientní změnou indexu lomu mají průměr jádra v hodnotách od 50 μ m- 140 μ m. [1], [3], [7]



Obr. 11: Mnohovidové optické vlákno s gradientní změnou indexu lomu [8]

Porovnání jednovidových a mnohovidových optických vláken:

Výhody jednovidových optických vláken:

- menší útlum;
- přenos dat na větší vzdálenosti;
- větší šířka pásma;
- přenos dat vyšší rychlostí.

Výhody mnohovidových optických vláken:

- vyšší hodnota numerické apertury;
- větší průměr vlákna;
- nižší cena.

Optická vlákna rozdělujeme na koncově vyzařující a stranově vyzařující. Pro stranově vyzařující optická vlákna se využívají mnohovidová vlákna větších průměrů. Paprsky procházejí z povrchu vlákna po celé jeho délce. K tomuto jevu dochází, pokud

je úhel dopadajícího paprsku N menší, než je kritický úhel N_c . (viz. rovnice č. 2). Toho můžeme dosáhnout např. zvýšením indexu lomu pláště, nebo naopak snížením indexu lomu jádra vlákna. U stranově vyzařujících optických vláken je rozdíl mezi indexy lomu v řádu setin (tj. kolem 1%). Pokud se rozdíl mezi indexy lomu zvyšuje, znamená to, že paprsky zůstávají uvnitř vlákna. [15], [18]

$$\phi_c = N_c = \arcsin \left(\frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \right) \quad (10)$$

n_1 ...index lomu jádra optického vlákna;

n_2 ...index lomu pláště optického vlákna;

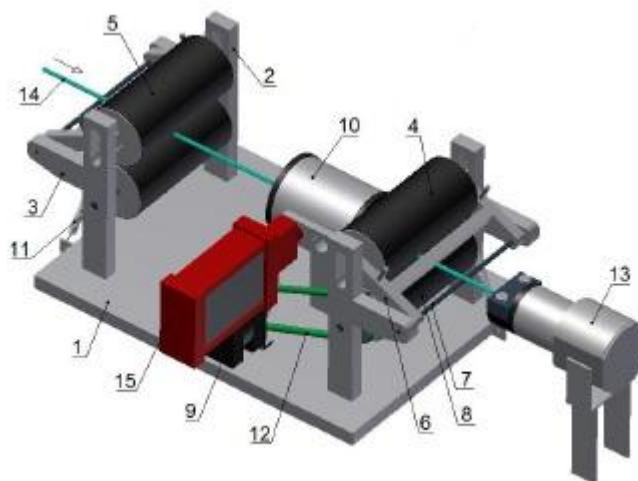
n_0 ...index lomu okolního prostředí (obvyčejně vzduch).

1.11 Metody měření světelné intenzity

Světelná intenzita stranově vyzařujících optických vláken se měří pomocí světelných senzorů, které pracují na principu fotodiody. Světelnou intenzitu lze měřit v napřímeném stavu vláken a v ohybu.

1.11.1 Měření světelné intenzity stranově vyzařujících optických vláken v napřímeném stavu

Zařízení POFIN1 pro měření světelné intenzity v napřímeném stavu bylo vyvinuto na Technické univerzitě v Liberci. Jedná se o poloautomatické zařízení, kde je vlákno přiváděno válečky pro vedení vlákna a odváděno odtahovými válečky poháněnými krokovým motorem. Samotné měření intenzity probíhá v temném tunelu, ke kterému je umístěn senzor. S tímto senzorem je přes program propojen krokový motor a po každém kroku motoru dojde k naměření světelné intenzity v daném místě měřeného vlákna.



Obr. 12: Zařízení POFIN1 pro měření světelné intenzity stranově vyzařujících optických vláken v napřímeném stavu [22]

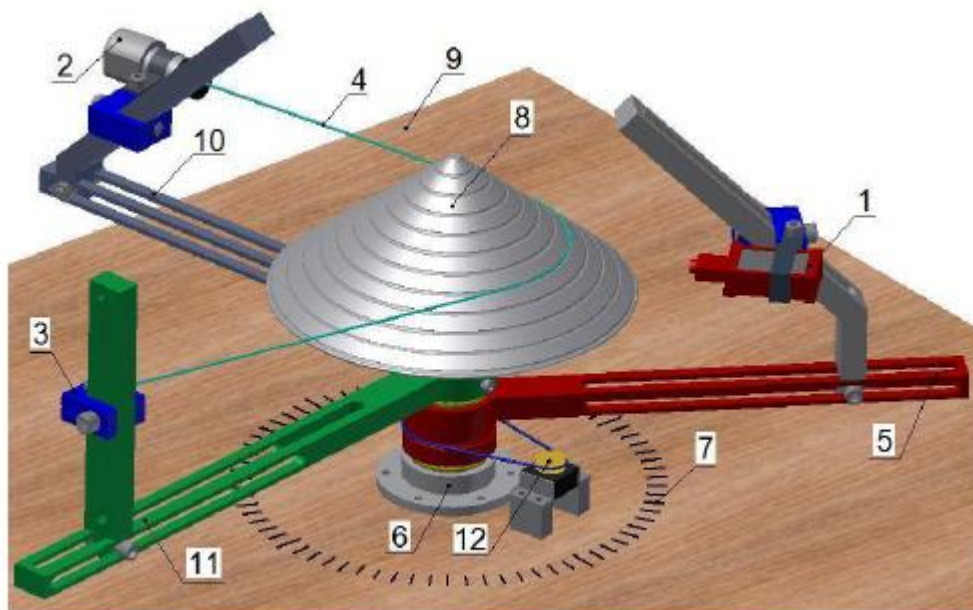
1- základní deska; 2- sloupky (4x); 3- konzole; 4- odtahové válečky; 5- přiváděcí válečky; 6- přitlačná páka válečku; 7- uložení páky; 8- hnaný odtahový váleček; 9- krokový motor; 10- měřící tunel; 11- tažné pružiny; 12- hrací řemen; 13- osvětlovací zařízení; 14- optické vlákno; 15- senzor světelné intenzity

Před samotným měřením je nutné nejdříve upravit příčný řez měřeného vlákna (úprava je podrobně popsána v experimentální části). Tato úprava se musí provádět před každým měřením, protože u neupraveného vzorku by mohlo dojít k tomu, že vlákno by nepohltilo všechny paprsky ze zdroje světla. Upravené vlákno se přes přiváděcí válečky navede do temného tunelu, poté přes odváděcí válečky ke zdroji světla. Měření je spouštěno softwarem, který byl vytvořen v programovacím jazyce Matlab. V programu je důležité navolit délku měření optického vlákna a krok. Program měří světelný výkon [W], který se vztahuje na plochu senzoru. V programu je k dispozici spektrum vyzářeného světla. Výstupem jsou data světelné intenzity v závislosti na vzdálenosti, uložená v souboru Excel. [18], [22], [23]

1.11.2 Měření světelné intenzity stranově vyzařujících optických vláken v ohybu

Zařízení POFLEX1 pro měření světelné intenzity stranově vyzařujících optických vláken v ohybu bylo vyvinuto na Technické univerzitě v Liberci. Pomocí otočných ramen je řešena poloha zdroje světla, uchycení měřeného vlákna a poloha

snímače světelné intenzity. Tato ramena dovolují změnit vzdálenost od středového sloupu a výšku od pracovního stolu. Samotný ohyb je zde vytvářen pomocí kuželu, který nabízí různé průměry ohybu. Pohon otočného ramene, na kterém je umístěn snímač, zajišťuje krokový motor.



Obr. 13: Zařízení pro měření světelné intenzity v ohybu optického vláken [22]

1- snímač světelné intenzity; **2-** zdroj světla; **3-** zajišťovací upínka; **4-** optické vlákno; **5-** otočný držák s posuvným sloupem pro snímače; **6-** středový sloup; **7-** úhelník; **8-** kužel s odstupňovanými drážkami pro vedení optického vlákna; **9-** pracovní deska; **10-** otočný držák s posuvným sloupem pro zdroje světla; **11-** otočný držák s otočným sloupem pro upnutí vlákna; **12-** krokový motor.

Stejně jako u předchozího přístroje, i zde je před samotným měřením nutná úprava příčného řezu optického vláken (podrobnější popis v experimentální části). Snímač je propojen se programem v počítači, kde je opět možné nastavit délku a krok měření. [18], [22], [23]

2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část obsahuje:

- Vlastní měření světelné intenzity stranově vyzařujících optických vláken v napřímeném stavu.
- Vlastní měření světelné intenzity stranově vyzařujících optických vláken v ohybu.
- Statistické zpracování a vyhodnocení naměřených hodnot.
- Návrh odtahového ústrojí ke stávajícímu zařízení pro měření světelné intenzity stranově vyzařujících optických vláken v napřímeném stavu.

2.1 Charakteristika používaných optických vláken

Pro experimentální část byla použita stranově vyzařující optická vlákna poskytnutá firmou Grace a Hypoff. Vlákná jsou různých průměrů, jak je uvedeno v následující tabulce č. 1. Výstupní data experimentu udávají průměrný světelný výkon [W] v závislosti na vzdálenosti od zdroje světla, který je vztažen na plochu senzoru ($13,3\text{mm}^2$), proto byl nutný přepočet na průměrnou světelnou intenzitu [W/m^2]. Byly konstruovány 95% konfidenční intervaly pro střední hodnotu v závislosti na vzdálenosti od zdroje světla. Naměřená data byla testována na normalitu a homogenitu, která byla potvrzena.

Tabulka 1: Průměry testovaných optických vláken

Grace		Hypoff
Flexi	Grace	
2 mm	0,25 mm	0,2 mm
3 mm	0,4 mm	0,3 mm
	0,5 mm	0,4 mm
	0,75 mm	1 mm
	1 mm	1,2 mm
		1,5 mm

V tabulce č. 2 a 3 jsou uvedeny parametry optických vláken firmy Grace, firma Hypoff tyto parametry neuvedla.

Tabulka 2: Parametry optických vláken typu Grace

Materiál jádra	polymethylmethakrylát
Materiál pláště	polykarbonát
Index lomu jádra	1,49
Index lomu pláště	1,41
Hustota [kg/m³]	1190
Numerická apertura	0,48
Vlnová délka [nm]	400- 900
Doporučená teplota [°C]	20- 70

Tabulka 3: Parametry optických vláken typu Flexi

Materiál jádra	polymethylmethakrylát
Materiál pláště	polytetrafluorethylen
Index lomu jádra	1,475
Index lomu pláště	1,34
Hustota [kg/m³]	1190
Numerická apertura	0,6
Vlnová délka [nm]	380- 780
Doporučená teplota [°C]	15- 80

2.2 Příprava vzorků

Před každým měřením bylo nutné upravit plochu řezu optického vlákna, která bude přivedena ke zdroji světla. Tato úprava se provádí, aby vlákno absorbovalo všechny paprsky vyslané zdrojem světla. V praxi to znamená, že čím bude řez vlákna plošší a hladší, tím lépe pohltí vyslané paprsky. Štípacími kleštěmi bylo vlákno odděleno od cívky a následně obrušována plocha vlákna pomocí brusných papírů. Broušení probíhalo manuálně, vlákno bylo uchyceno do kleští a broušeno o brusný papír zrnitosti 400 (tj. počet zrn na cm²), poté o jemnější brusný papír zrnitosti 1000. Při obrušování je důležité, aby vlákno uchycené v kleštích bylo k brusnému papíru v kolmé poloze. Na závěr bylo vlákno ještě obrušováno diamantovým práškem, který je určený

k zalešťování optických čoček. Všechna měřená vlákna byla upravována tímto způsobem, vlákna „Flexi“ jsou leštěna pouze diamantovým práškem. Při obrušování a leštění je nutné dbát na to, aby byla tato operace prováděna stejnoměrně u všech měřených vzorků. Po upravení plochy řezu optického vlákna je vlákno přivedeno ke zdroji světla tak, aby vstřebalo co nejvíce paprsků světla, které ze zdroje vyzařují. Vlákně se musí takto upravit před každým měřením na zařízení pro měření světelné intenzity optických vláken v napřimeném stavu i v ohybu.

2.3 Měření světelné intenzity stranově vyzařujících optických vláken v napřimeném stavu

Měření probíhalo v laboratořích optických metod na Technické univerzitě v Liberci.

Použitý měřicí přístroj: POFIN1 PL 21- 601- 01/01. Experiment byl prováděn na základě interní normy č. IN 21 -601 -01/01 [23].

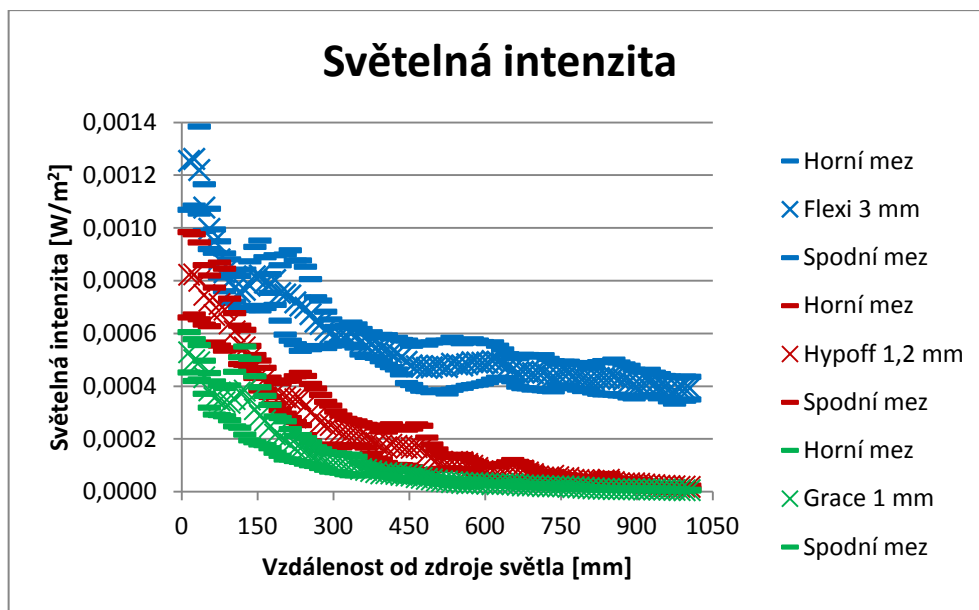
Podmínky měření: měřená délka: 1000 m;

- délka kroku: 10 mm;
- počet měření: 10 měření pro každý typ a průměr vlákna;
- světelný výkon zdroje světla: 43,9 W/m²;
- měřená vlákna: Flexi Ø 2 a 3 mm

Grace Ø 0,25; 0,4; 0,5; 0,75 a 1 mm

Hypoff Ø 0,2; 0,3; 0,4; 1; 1,2 a 1,5 mm.

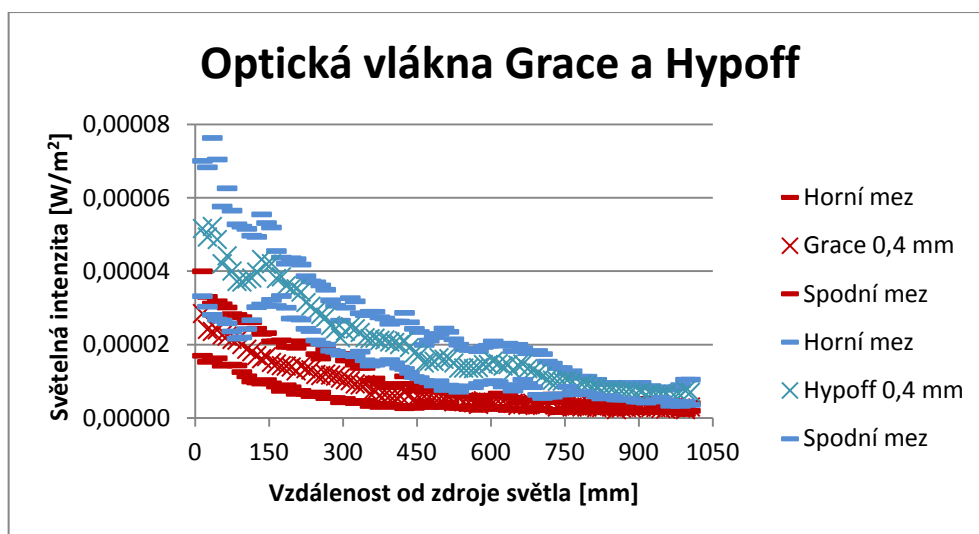
Měření bylo prováděno vždy ve vzdálenosti 15 mm od zdroje světla. Na obr. č. 14 je zobrazen graf střední hodnoty světelné intenzity optických vláken, včetně horních a dolních mezí konfidenčních intervalů.



Obr. 14: Světelná intenzita optických vláken

Na obr. č. 14 je znázorněna světelná intenzita optických vláken typu Flexi, Grace a Hypoff různých průměrů. Bylo potvrzeno, že s rostoucí vzdáleností od zdroje světla klesá intenzita vyzařování (viz. kap. 1.9). U vláken větších průměrů je intenzita statisticky významně vyšší než u vláken menších průměrů. Výsledky měření jednotlivých vláken jsou zaznamenány do grafů a uvedeny v příloze č. 1.

Dvě optická vlákna firmy Grace a Hypoff disponují stejnými průměry. Vlákna byla porovnávána vzájemně mezi sebou vzhledem k statistické významnosti naměřených dat, vše je uvedeno na obr. č. 15.



Obr. 15: Porovnání světelné intenzity optických vláken Grace a Hypoff

Na obr. č. 15 jsou zobrazeny naměřené hodnoty světelné intenzity a příslušné konfidenční intervaly vlákna firmy Grace a Hypoff stejného průměru 0,4 mm. Druhý graf vláken typu Grace a Hypoff průměru 1 mm je uveden v příloze. Z grafu tedy vyplývá, že rozdíl mezi naměřenými daty je statisticky nevýznamný, protože se horní a dolní meze konfidenčního intervalu překrývají.

2.3.1 Vyhodnocení naměřených dat dle metody 1

Pro další zpracování je nutné světelnou intenzitu vyhladit a určit její parametry dle rovnic (4) až (7). Pro následující zpracování dat přepíšeme rovnici (4) do tvaru:

$$P(L) = P(0) \cdot 10^{-\alpha \cdot \frac{L}{10}} [W/m^2] \quad (11)$$

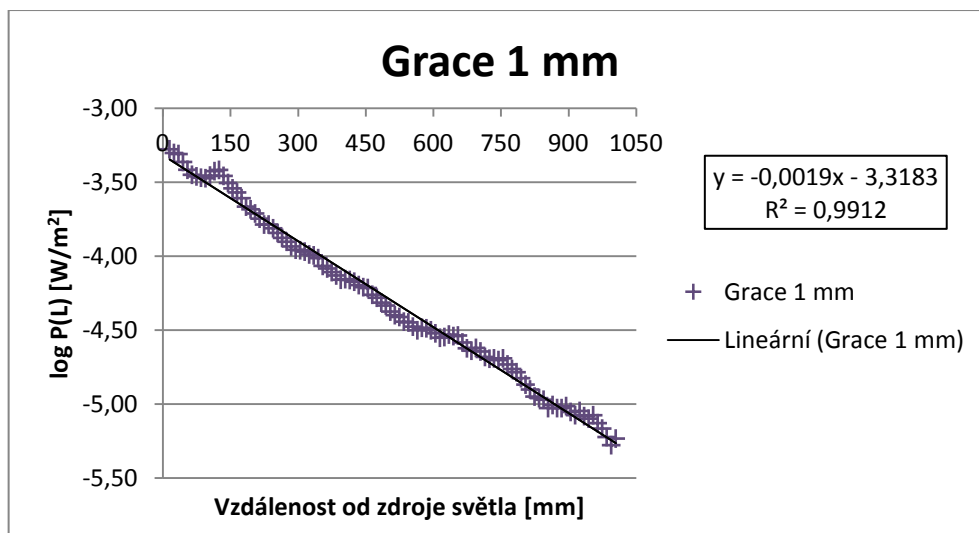
$P(L)$...průměrná hodnota intenzity vyzařování [W/m^2],

$P(0)$...průměrná intenzita vyzařování na vstupu do vlákna [W/m^2],

α_L ...průměrná rychlost útlumu [dB/mm],

L ...vzdálenost od zdroje světla [mm]

Pomocí lineární regrese byly nalezeny parametry přímky, jak je naznačeno v grafu na obr. č. 16 na příkladu optického vlákna typu Grace průměru 1 mm. Další grafy jsou uvedeny v příloze 1.



Obr. 16: Lineární regrese pro stanovení parametrů Grace 1 mm

Po logaritmizaci hodnot rovnice (11) vznikne rovnice přímky:

$$\log P(L) = -\alpha_L \frac{L}{10} + \log P(0) \quad (12)$$

U rovnice přímky (12) získáme směrnici přímky k , pomocí které lze vypočítat průměrnou rychlost útlumu α_L :

$$\alpha_L = -10 \cdot k \text{ [dB/mm]} \quad (13)$$

k ...směrnice přímky.

Z úseku přímky q určíme intenzitu vyzařování na vstupu do vlákna:

$$P(0) = 10^q \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (14)$$

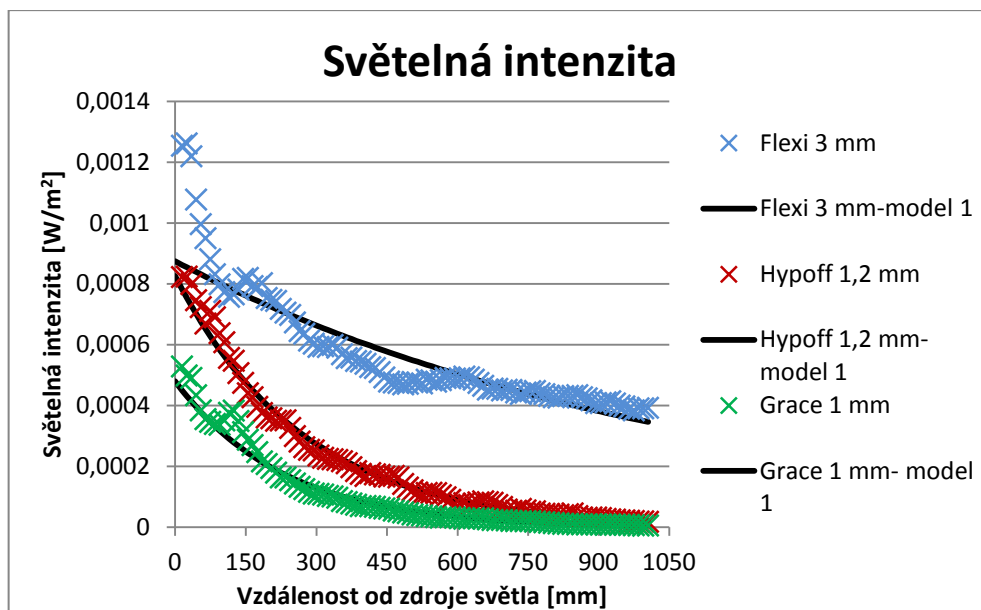
q ...úsek přímky. [18], [26]

Na základě lineární regrese byly nalezeny již zmíněné parametry regresních přímek k , q a koeficient determinace R^2 . Parametr $P(0)$ udává velikost světelné intenzity na vstupu optického vlákna u zdroje světla, tedy ve vzdálenosti $L=0$. Parametry $P(0)$ a α_L vybraných vláken jsou uvedeny v tabulce č. 4 (v příloze č. 1 je tabulka parametrů ostatních vláken).

Tabulka 4: Parametry $P(0)$ a α_L

Typ vlákna	Průměr vlákna [mm]	$P(0)$ [W/m ²]	α_L [dB/mm]
Grace	1	0,00048	0,019
Hypoff	1,2	0,000826	0,016
Flexi	3	0,000874	0,004

Na následujícím obr. č. 17 je zobrazen graf, který znázorňuje experimentální data s vyhlazením metodou 1 optických vláken typu Flexi, Hypoff a Grace (grafy vyhlazených křivek jednotlivých vláken jsou zobrazeny v příloze č. 1).



Obr. 17: Porovnání experimentálních a vyhlazených dat světelné intenzity

Diskuze výsledků:

Z grafu, zobrazeném na obr. č. 17 je patrné, že optická vlákna větších průměrů dosahují vyšších hodnot světelné intenzity. Vyhlazené hodnoty jsou včetně hodnoty $P(0)$, tedy světelné intenzity ve vzdálenosti $L=0$ od zdroje světla. Z grafu tedy vyplývá, že u vláken větších průměrů (zde např. Flexi 3 mm) dochází při vyhlazení dat k prudkému poklesu světelné intenzity v závislosti na krátké vzdálenosti od zdroje světla. V tomto případě parametry $P(0)$ a α_L neodpovídají skutečným výsledkům, proto je vhodné funkci vyhladit pomocí druhé metody LLF2 (viz. kapitola 2.3.2).

Pracovní délka optického vlákna dle metody 1

Pracovní délka L_p udává v jaké vzdálenosti od zdroje světla, bude mít vlákno ještě postačující vyzářený výkon P_{Lp} , to znamená, do jaké délky lze vlákno reálně použít. Pro účely této práce byl zvolen útlum v rozsahu $\alpha_{Lp}=4-20$ dB. Nejprve je určen vyzářený výkon na konci pracovní délky při postačujícím útlumu, dle rovnice (15):

$$P_{Lp} = P(0) \cdot 10^{\frac{-\alpha_{Lp}}{10}} [W/m^2] \quad (15)$$

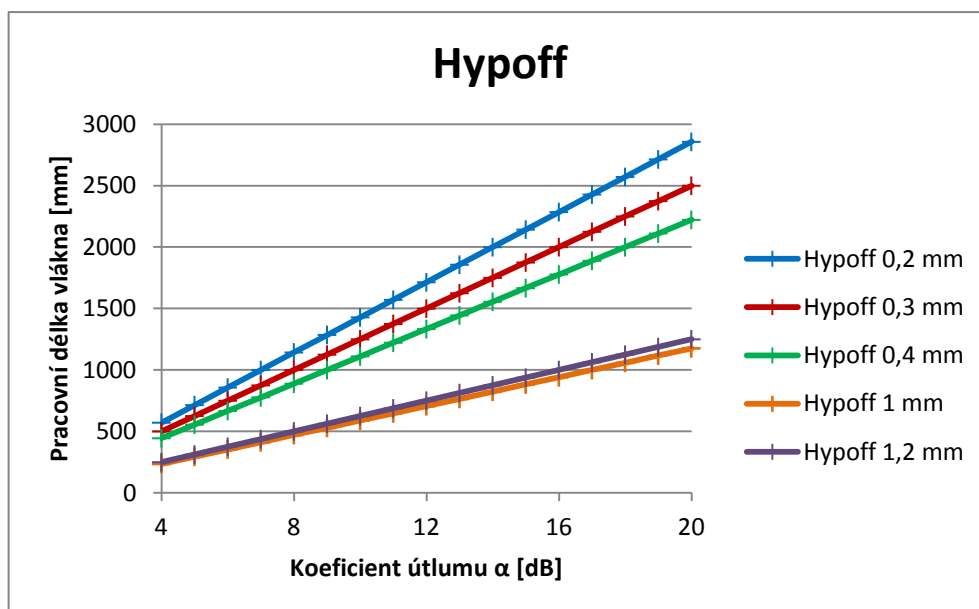
α_{Lp} ...útlum [dB].

Tuto hodnotu dosadíme do rovnice (16), ze které získáme pracovní délku optického vlákna:

$$L_p = \frac{10}{\alpha_L} \cdot \log \left(\frac{P_0}{P_{Lp}} \right) [mm] \quad (16)$$

α_L ...průměrná rychlost útlumu [dB/mm]. [18]

V případě metody 1 je hodnota průměrné rychlosti útlumu α_L konstantní. Pracovní délka optických vláken typu Hypoff různých průměrů je zanesena v grafu na obr. č. 18. Grafy vláken typu Grace a Flexi jsou k nahlédnutí v příloze.



Obr. 18: Pracovní délka stranově vyzařujících optických vláken typu Hypoff

Diskuze výsledků:

Na grafu pracovní délky optických vláken typu Hypoff, který je zobrazen na obr. č. 18, je znatelně ukázán vliv průměru vláken na intenzitu vyzařování a tedy i na pracovní délku vlákna. Vláknem Hypoff průměru 1,5 mm dosahuje stejných hodnot pracovní délky jako vláknem Hypoff průměru 1 mm, proto není v grafu zaneseno. Optická vlákna menších průměrů dosahují větších hodnot pracovní délky. To znamená, že tato vlákna budou při delší vzdálenosti od zdroje světla dosahovat vyšších hodnot světelné intenzity, oproti optickým vláknům větších průměrů. Je nutno dodat, že se

počítá s konstantní hodnotou průměrné rychlosti útlumu α_L . Jak bylo již zmíněno výše, při vyhodnocování metodou 1 neodpovídá parametr α_L skutečnosti, proto i pracovní délka je dále zpracovávána pomocí druhé metody LLF2 (viz. kapitola 2.3.2).

2.3.2 Vyhodnocení naměřených dat dle metody LLF2

Světelná intenzita stranově vyzařujících optických vláken byla dále vyhlazena metodou LLF2, která je založena na využití lineární lomené funkce pomocí 2 přímek. Při vyhodnocování metodou LLF2 je postup následující:

- vstupní data: hodnoty x – vzdálenost od zdroje světla [mm],
hodnoty y – světelná intenzita optického vlákna [W/m^2],
- souřadnice $\{x_i; y_i\}$ pro $i=1,2,\dots,n$, se rozdělí do dvou skupin tak, že se postupně volí průsečík obou přímek, např. $\{x_3; y_3\} \equiv \{x_c; y_c\}$, souřadnice jsou dále označeny $\{x_i; y_i\}$ pro $i=1,2$, následuje průsečík přímek, tj. bod $x_c; y_c$ a zbylé souřadnice jsou označeny $\{x_j; y_j\}$, kde $j=1,2,\dots,n-3$.
- v dalším kroku se metodou nejmenších čtverců určí směrnice k_1 a úsek přímky q_1 , kde pro $x_i < x_c$ je rovnice přímky $y = k_1 x + q_1$, dle rovnic (17)

$$k_1 = \frac{\sum_i (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_j (x_i - \bar{x})^2}, \quad q_1 = \bar{y} - k_1 \bar{x} \quad (17)$$

kde \bar{x} a \bar{y} jsou průměrné hodnoty souřadnic,

- v dalším bodě se určí reziduální součet čtverců odchylek S_1 pomocí rovnice (18)

$$S_1 = \sum_i (y_i - k_1 x_i - q_1)^2 \quad (18)$$

- pro $x_i = x_c$ platí $y_c = k_1 x_i + q$
- pro $x_j > x_c$ je rovnice přímky $y = y_c + k_2(x - x_c)$, kde $q_2 = y_c - k_2 x_c$, a tedy $y = k_2 x + q_2$, dále se metodou nejmenších čtverců určí směrnice 2. přímky k_2 , úsek 2. přímky q_2 a reziduální součet čtverců odchylek S_2 dle následujících rovnic (19)

$$k_2 = \frac{\sum_j (y_j - y_c)(x_j - x_c)}{\sum_j (x_j - x_c)^2}, \quad q_2 = y_c - k_2 x_c, \quad S_2 = \sum_j (x_j - x_c)^2 \quad (19)$$

- posledním bodem je výpočet souhrnného reziduálního součtu čtverců odchylek od obou přímek dle rovnice (20) a nalezne se jeho minimální hodnota v závislosti na poloze x_c .

$$S_c = S_1 + S_2 \quad (20)$$

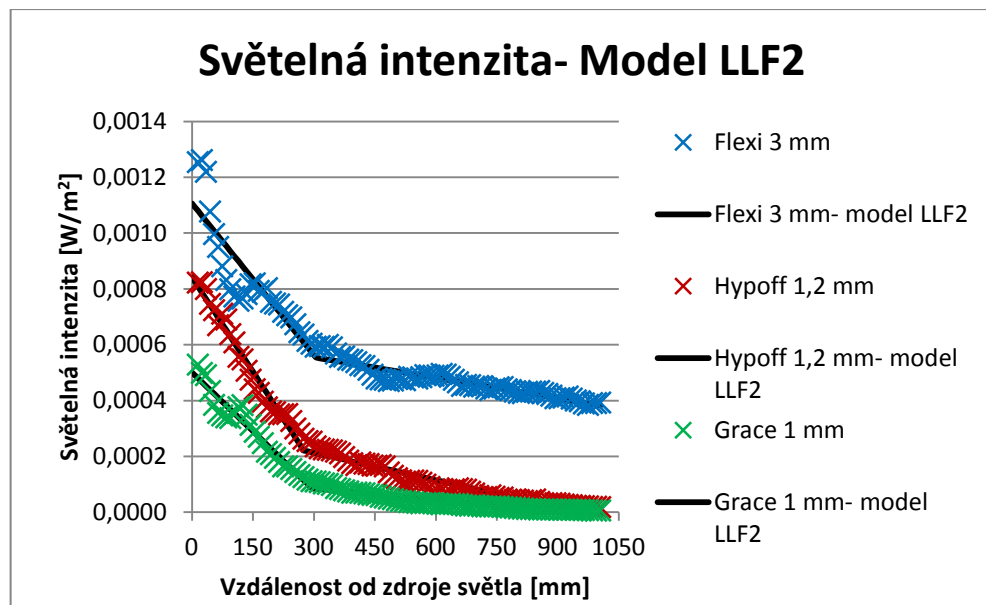
Pro nalezení optimálních parametrů metodou LLF2 pomocí lineární regrese a celkového reziduálního součtu čtverců odchylek byl použit vytvořený software v programu Matlab. [18]

Pro každé měřené optické vlákno byly nalezeny následující parametry:

$P(0)_{kor}$ - korigovaná světelná intenzita vyzařování na vstupu do vlákna,

k_1 a k_2 - směrnice první a druhé přímky,

q_1 a q_2 - úseky první a druhé přímky (úsek první přímky q_1 odpovídá světelné intenzitě $P(0)_{kor}$). Na následujícím obr. č. 19 je uveden graf světelné intenzity v porovnání experimentálních dat s daty vyhlazenými metodou LLF2, grafy jednotlivých vláken jsou uvedeny v příloze č. 1.



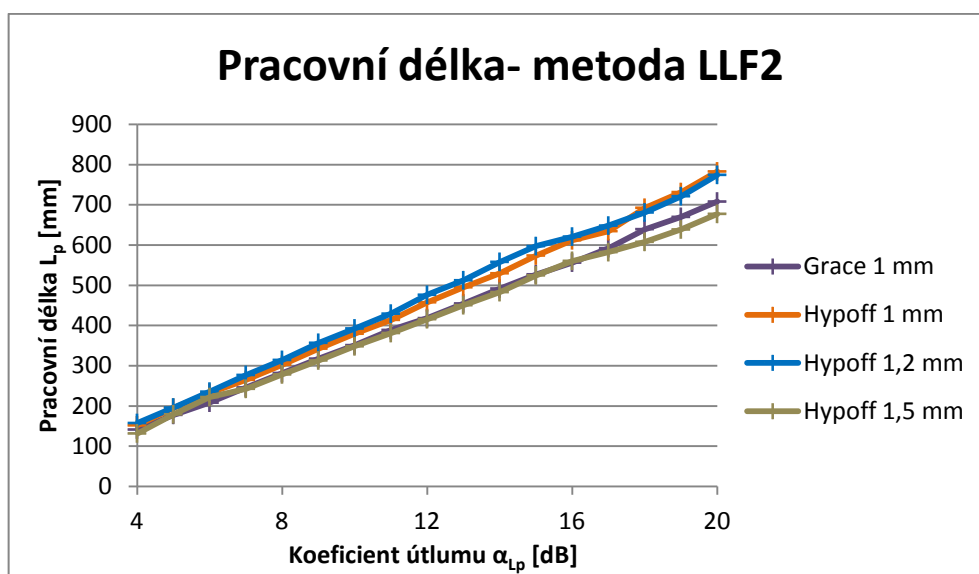
Obr. 19: Porovnání světelné intenzity- experimentální data s vyhlazenými daty metodou LLF2

Diskuze výsledků:

Na obr. č. 19 je zobrazen graf světelné intenzity experimentálně naměřených dat a vyhodnocení pomocí metody LLF2. Tato metoda vede k přesnějším odhadům světelné intenzity na vstupu do vlákna, tedy v nulové vzdálenosti od zdroje světla. Z grafu vyplývá, že hodnota $P(0)$ u vlákna Flexi (3 mm) se nepříblížila experimentálním výsledkům, což může být způsobeno špatným navedením vlákna ke zdroji světla. Je zde zachován obecný předpoklad, čím větší je průměr vlákna, tím vyšších hodnot světelné intenzity vlákno dosahuje.

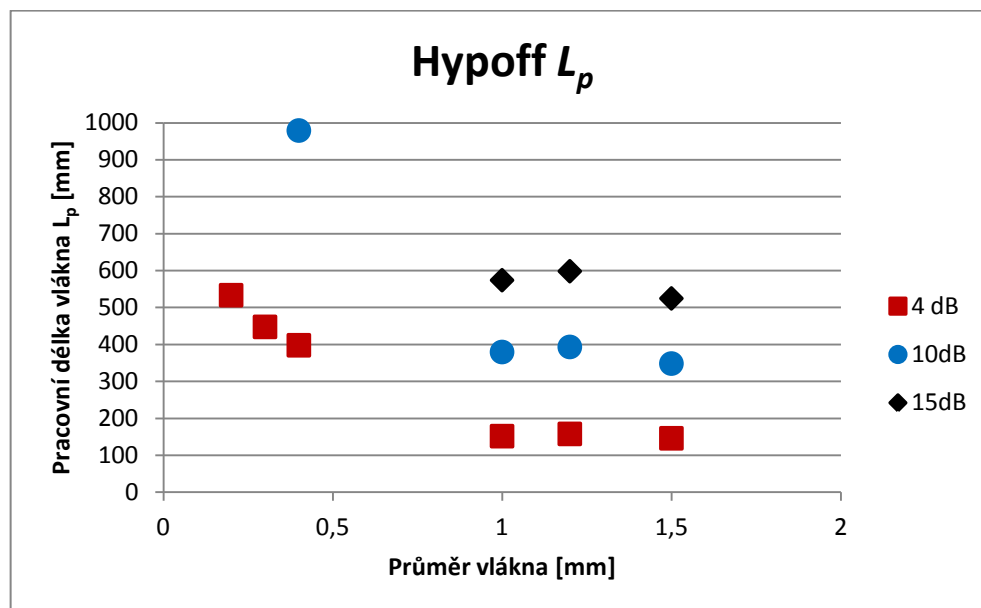
Pracovní délka optického vlákna dle metody LLF2

Pracovní délka optických vláken byla již vysvětlena a popsána v předchozí kapitole (2.3.1). Pro účely této práce byl opět zvolen útlum $\alpha_{Lp} = 4\text{--}20\text{ dB}$, aby bylo možné obě metody mezi sebou porovnávat, proto byla pro vysvětlení výsledků vybrána pouze vlákna, která dosahují těchto hodnot útlumu. Dle rovnic (15) a (16) v kap. 2.3.1. byl určen vyzářený výkon na konci pracovní délky, při daném útlumu a poté pracovní délka. Výsledky jsou zaneseny do grafu obr. č. 20.

**Obr. 20: Pracovní délka optických vláken- model LLF2**

Jak bylo zmíněno výše, některá optická vlákna dosahují na měřené délce útlumu pouze 4dB. Proto je na obr. č. 21 uveden graf, kde je bodově zaznamenáno, jaké pracovní délky při určitém útlumu dosahují optická vlákna daných průměrů. Zde jsou

uvedena optická vlákna typu Hypoff, grafy vláken typu Grace a Flexi jsou k nahlédnutí v příloze č. 1.



Obr. 21: Pracovní délka stranově vyzařujícím optických vláken typu Hypoff-model LLF2

Diskuze výsledků:

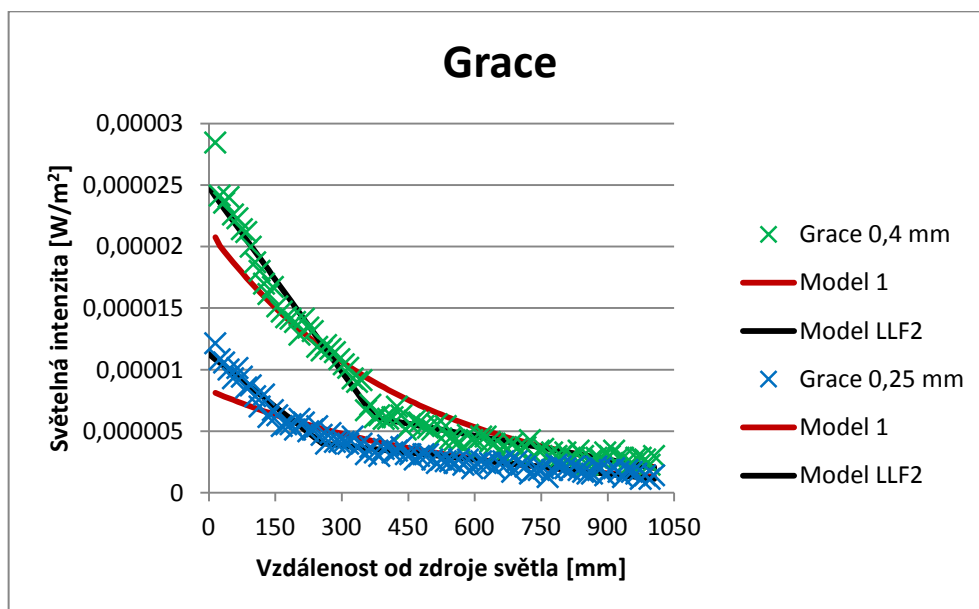
Z grafu na obr. č. 20 je patrné, že uvedená vlákna (Grace 1mm, Hypoff 1; 1,2 a 1,5 mm) při zvoleném útlumu v rozmezí 4- 20dB dosahují přibližně stejných hodnot pracovní délky. Rozdíly mezi výsledky pracovní délky uvedených vláken jsou statisticky nevýznamné. Byly konstruovány konfidenční intervaly a horní a dolní meze intervalů se mezi jednotlivými vlákny překrývají. Obecně by se dalo říci, že např. ve vzdálenosti 800 mm od zdroje světla budou použita vlákna dosahovat útlumu 20dB, tj. že dochází již k značnému vyzáření a s tím spojený útlum světelné intenzity.

Graf na obr. č. 21 je pro vyjádření pracovní délky již přehlednější, je to díky tomu, že jsou zde uvedeny hodnoty pracovní délky pouze optických vláken typu Hypoff při hodnotách útlumu 4, 10 a 15dB. Z grafu tedy vyplývá, že vlákna menších průměrů, (0,2; 0,4 a 0,5 mm) dosahují vyšších hodnot pracovní délky při nižším útlumu, než vlákna větších průměrů (1; 1,2 a 1,5 mm). To znamená, že u vláken menších průměrů nedochází v krátké vzdálenosti od zdroje světla k tak prudkému útlumu světelné intenzity. Konkrétně hodnoty útlumu 4dB dosahují vlákna menších průměrů až v délce

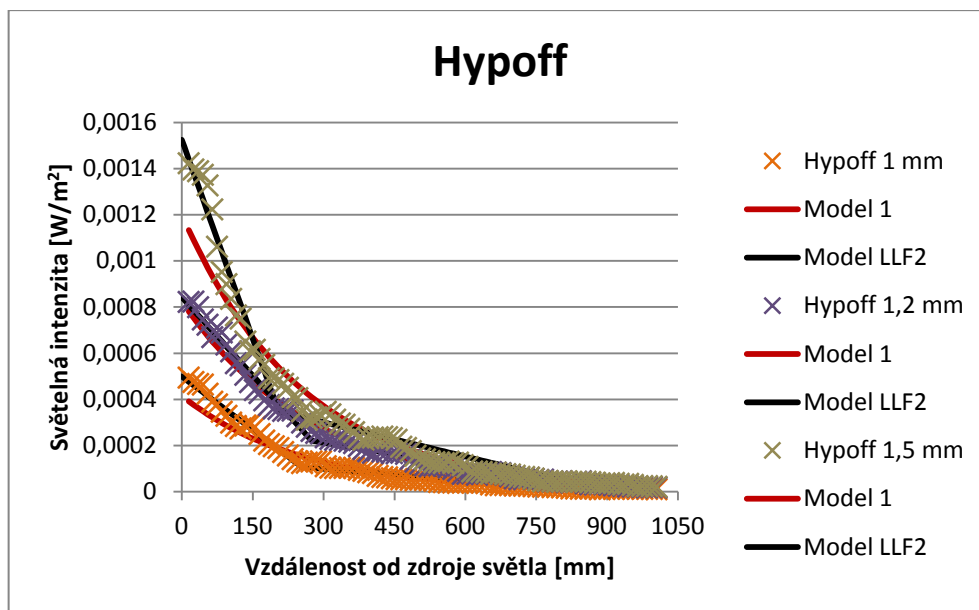
okolo 500 mm, oproti vláknům větších průměrů (1; 1,2 a 1,5 mm), která této hodnoty útlumu dosáhnou již při vzdálenosti okolo 200 mm od zdroje světla.

2.3.3 Porovnání metody 1 a metody LLF2

Obě metody jsou založeny na principu lineární regrese, u metody LLF2 se navíc využívá lineární lomené funkce, které se skládá ze dvou přímek. U metody 1 docházelo k nepřesným odhadům parametrů $P(0)$ a α_L , proto byla použita pro vyhodnocování i metoda LLF2. Následující grafy zobrazují porovnání experimentálních dat se zmíněnými metodami.

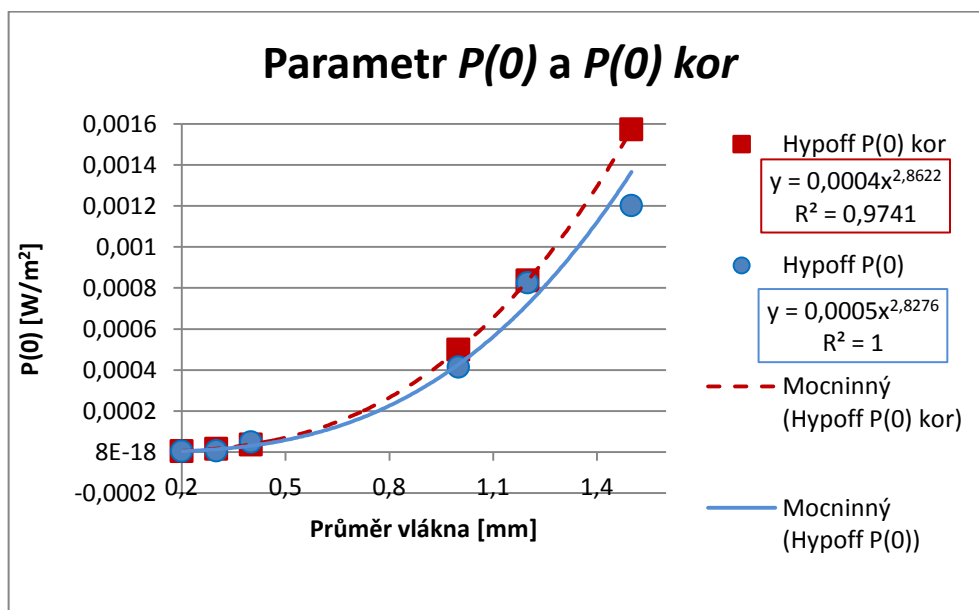


Obr. 22: Porovnání experimentálních dat světelné intenzity s modelem 1 a LLF2-
vlákna typu Grace



Obr. 23: Porovnání experimentálních dat světelné intenzity s modelem 1 a LLF2-
vlákna typu Hypoff

Na následujícím obr. č. 24 je uveden graf porovnávající parametry $P(0)$ a $P(0)_{kor}$ u vláken typu Hypoff, včetně koeficientu determinace R^2 .



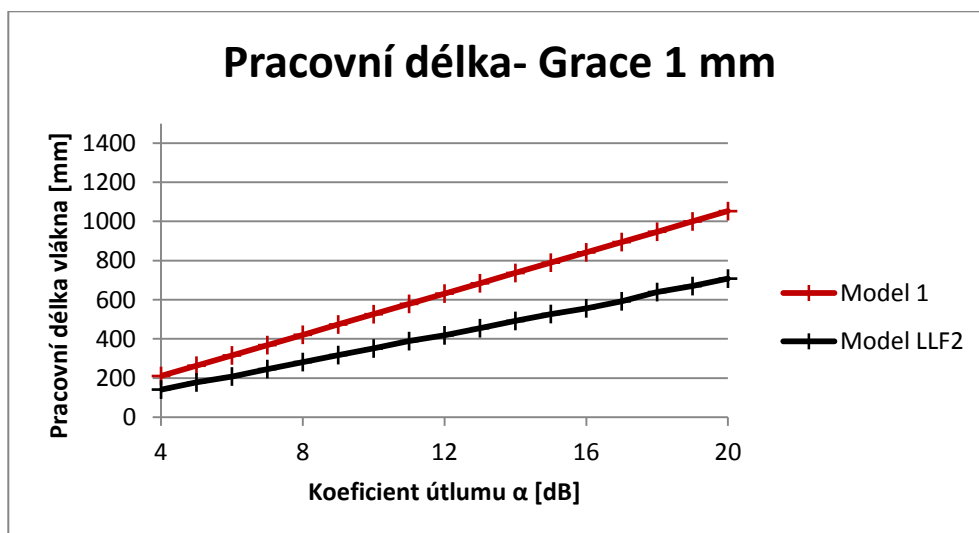
Obr. 24: Porovnání parametrů $P(0)$ a $P(0)_{kor}$

Diskuze výsledků:

Na obr. č. 22 a 23 jsou zobrazeny grafy světelné intenzity s vyhlazením metodou 1 a LLF2 optických vláken typu Grace a Hypoff. Z grafů je patrné, že v případě použití metody LLF2 hodnoty světelné intenzity lépe kopírují experimentální data, to znamená, že hodnoty odpovídají skutečnému modelu. V grafu na obr. č. 24 bylo tohoto tvrzení prokázáno zanesením parametrů $P(0)$ (světelná intenzita na vstupu do vlákna vyhodnocená metodou 1) a $P(0)_{kor}$ (světelná intenzita na vstupu do vlákna vyhodnocená metodou LLF2) v závislosti na průměru vlákna. Z grafu vyplývá, že parametr $P(0)_{kor}$ (metoda LLF2) dosahuje vyšších hodnot světelné intenzity oproti parametru $P(0)$ (metoda 1). U vláken menších průměrů (0,2; 0,3 a 0,4 mm) jsou rozdíly mezi těmito parametry nepatrné, avšak u vláken větších průměrů (1; 1,2 a 1,5 mm) je tento rozdíl statisticky významný.

Pracovní délka optického vlákna- porovnání metody 1 a metody LLF2

V této části jsou mezi sebou porovnávána vlákna, která dosahují na měřené délce útlumu v rozmezí 4- 20 dB u metody LLF2 s metodou 1. Pro vysvětlení je uveden graf na obr. č. 25, kde je vyjádřena pracovní délka vyhodnocená pomocí metody 1 a pracovní délka vyhodnocená metodou LLF2, optického vlákna typu Grace průměru 1 mm. Grafy pracovních délek optických vláken typu Hypoff jsou uvedena v příloze č. 1.



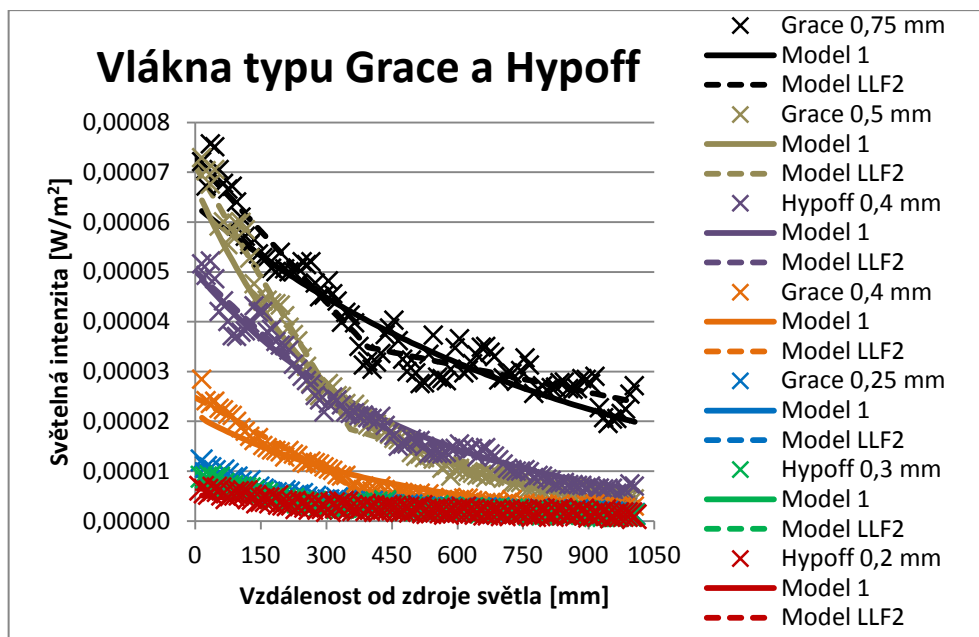
Obr. 25: Porovnání pracovní délky model 1 a model LLF2- Grace 1 mm

Diskuze výsledků:

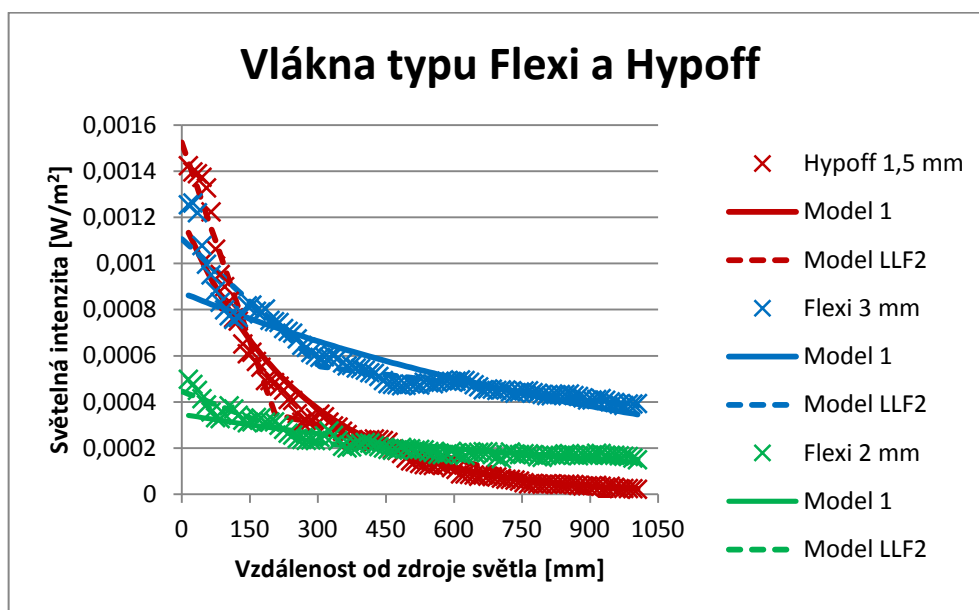
Z grafu je zřejmé, že hodnocení pracovní délky optického vlákna metodou LLF2 vede k nižším hodnotám této délky. V praxi to tedy znamená, že optické vlákno dosáhne vyšší hodnoty útlumu (např. 20 dB) již při kratší vzdálenosti od zdroje světla, oproti hodnocení metodou 1. Rozdíly jsou zásadní, u zde uvedeného příkladu se při útlumu 20dB liší pracovní délka modelu 1 od modelu LLF2 rozdílem cca 300 mm. To je při měřené délce 1000 mm velmi významný rozdíl. Při vyhodnocení metodou 1 dosahovalo vlákno Grace Ø 1mm útlumu 20 dB až za měřenou délkou, tedy konkrétně v délce 1050 mm, oproti tomu při vyhodnocení metodou LLF2 stejné vlákno dosahovalo stejné hodnoty útlumu již v délce 700mm.

2.3.4 Vliv průměru vlákna na intenzitu vyzařování

Měření bylo realizováno na optických vláknech průměrů v rozmezí 0,2- 3 mm. Průměr vlákna je při měření světelné intenzity velmi důležitým parametrem. Čím je plocha příčného řezu vlákna větší, tím je vlákno schopno pojmout více parsků, které vysílá zdroj světla. Světelná intenzita optických vláken průměrů v rozmezí 0,2- 0,75mm, včetně vyhlazení metodou 1 a LLF2 je zobrazena na následujícím obr. č. 26. Dále je zde uveden graf vláken průměrů 1,5 – 3mm na obr. č. 27, graf vláken zbývajících průměrů je uveden v příloze č. 1.



Obr. 26: Vliv průměru vlákna na intenzitu vyzařování- Grace a Hypoff



Obr. 27: Vliv průměru vlákna na intenzitu vyzařování- Flexi a Hypoff

Diskuze výsledků:

Graf na obr. č. 26 zobrazuje světelnou intenzitu stranově vyzařujících optických vláken typu Grace a Hypoff průměrů 0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,5 a 0,75 mm. Je zde názorně dokázáno, že vlákna větších průměrů dosahují vyšších hodnot světelné intenzity.

Nejvyšší míru vyzařování z uvedeného výběru vykazuje vlákno typu Grace průměru 0,75 mm, nejnižší pak vlákno typu Hypoff průměru 0,2 mm. Výsledky tedy odpovídají obecnému předpokladu, že čím větší je průměr vlákna, tím bude intenzita vyzařování dosahovat vyšších hodnot.

Na obr. č. 27 je zobrazen graf světelné intenzity stranově vyzařujících optických vláken typu Flexi a Hypoff průměrů 1,5; 2 a 3 mm. V tomto případě, nelze jednoznačně říci, že vlákna větších průměrů dosahují vyšší světelné intenzity. Z grafu vyplývá, že optické vlákno typu Hypoff o průměru 1,5 mm vykazuje vyšší hodnoty světelné intenzity než vlákna typu Flexi průměrů 2 a 3 mm. U vlákna typu Hypoff je oproti vláknům typu Flexi znatelný prudký pokles intenzity v závislosti na vzdálenosti od zdroje světla. Tento rozdíl mezi vlákny typu Flexi a Hypoff může být způsobený odlišným použitým materiálem pláště vlákna. Tento výsledek však nemůžeme dokázat, protože i přesto, že vlákna typu Hypoff disponují přibližně stejnými vlastnostmi jako vlákna typu Grace, konkrétní údaje těchto vláken nebyli dodavatelem poskytnuty.

2.4 Měření světelné intenzity stranově vyzařujících optických vláken v ohybu

Měření probíhalo v laboratořích optických metod na Technické univerzitě v Liberci.

Použitý měřicí přístroj: POFLEX1 PL 21- 602- 01/01. Experiment byl prováděn na základě interní normy č. IN 21- 602- 01/01 [24].

Podmínky měření: měřená délka: 360 mm;

- délka kroku: 5 mm;
- počet kroků: 72;
- počet měření: 10 měření pro každý průměr kotouče u všech průměrů vlákna;
- světelný výkon zdroje světla: 43,9 W/m²;
- průměr měřených kotoučů: 10; 20; 30; 40; 50; 100; 150; 200; 250; 300 a 350 mm;
- měřená vlákna: Hypoff Ø 1; 1,2 a 1,5 mm.

Měření bylo prováděno až do úhlu ohybu 180°, vždy ve vzdálenosti 200 mm od zdroje světla. Senzor snímající světelnou intenzitu byl 2 mm od měřeného vlákna. Pro každý průměr kotouče bylo zapotřebí spočítat skutečnou měřenou délku a skutečnou délku kroku, jednoduše pomocí obvodu kruhu, výsledky jsou uvedeny v následující tabulce č. 5.

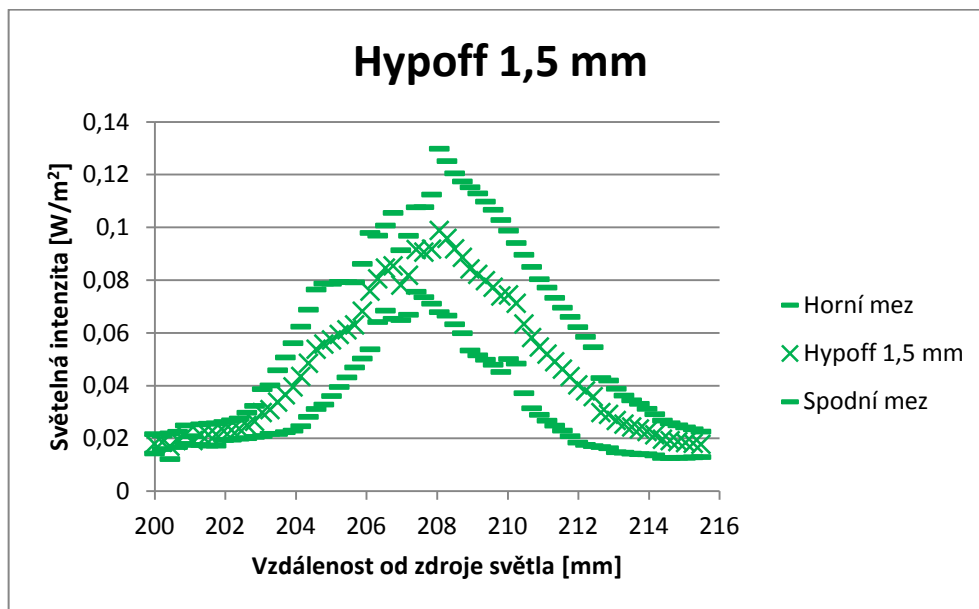
Tabulka 5: Hodnoty skutečné měřené délky a skutečné délky kroku

Průměr kotouče:	$L_{skut.}$ [mm]	$l_{skut.}$ [mm]
Ø 10 mm	15,708	0,218
Ø 20 mm	31,416	0,436
Ø 30 mm	47,123	0,654
Ø 40 mm	62,832	0,873
Ø 50 mm	78,540	1,091
Ø 100 mm	157,080	2,182
Ø 150 mm	235,619	3,273
Ø 200 mm	314,159	4,363
Ø 250 mm	392,699	5,454
Ø 300 mm	471,239	6,545
Ø 350 mm	549,780	7,635

kde $L_{skut.}$... skutečná měřená délka [mm],

$l_{skut.}$... skutečná délka kroku [mm].

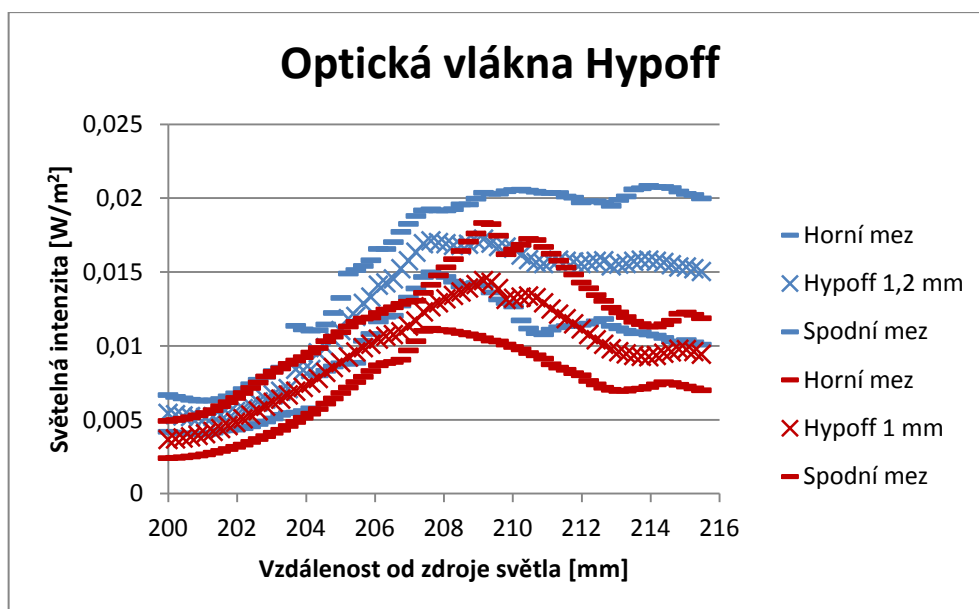
Na obr. č. 28 je zobrazen graf střední hodnoty světelné intenzity optického vlákna v ohybu včetně horních a dolních mezí konfidenčních intervalů.



Obr. 28: Světelná intenzita optického vlákna Hypoff Ø 1,5 mm v ohybu- Ø kotouče 10 mm

V grafu je znázorněna světelná intenzita optického vlákna Hypoff průměru 1,5 mm v ohnutém stavu kotouče průměru 10 mm. Zobrazené výsledky v grafu značí, že nejdříve světelná intenzita prudce stoupá a přibližně v poloviční vzdálenosti opět prudce klesá. Při ohýbání optického vlákna okolo kotouče průměru 10 mm dochází k značnému vyzáření paprsků mimo vlákno, z důvodu překročení kritického úhlu ohybu (viz. kap. 1.8.) se paprsky lámou a pronikají skrze plášť optického vlákna.

V ohybu byla měřena optická vlákna Hypoff průměrů 1; 1,2 a 1,5 mm. Na obr. č. 29 je uveden graf světelné intenzity optických vláken Hypoff průměru 1 a 1,2 mm při ohybu okolo kotouče průměru 10 mm.

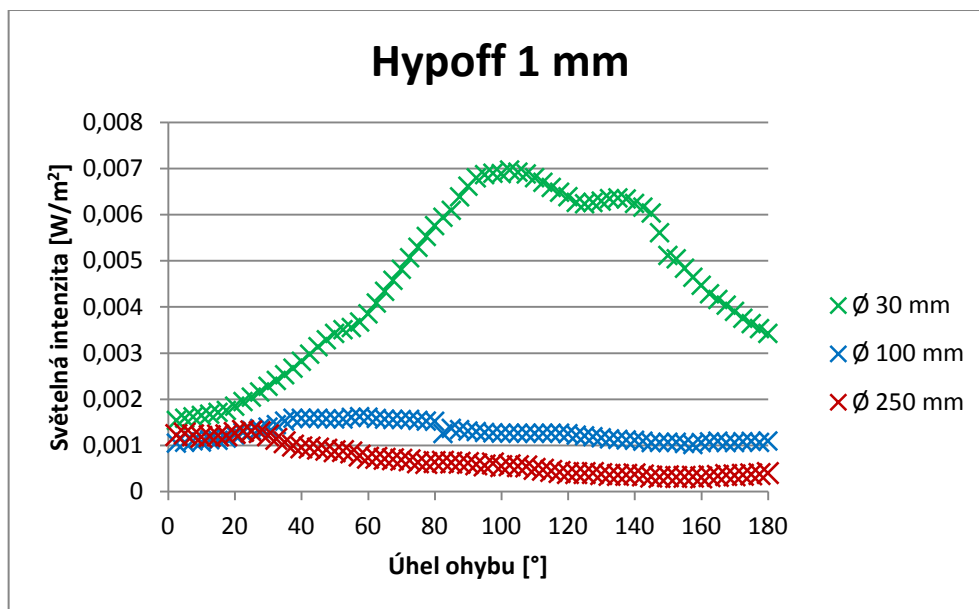


Obr. 29: Porovnání světelné intenzity optických vláken v ohybu- kotouč 10 mm

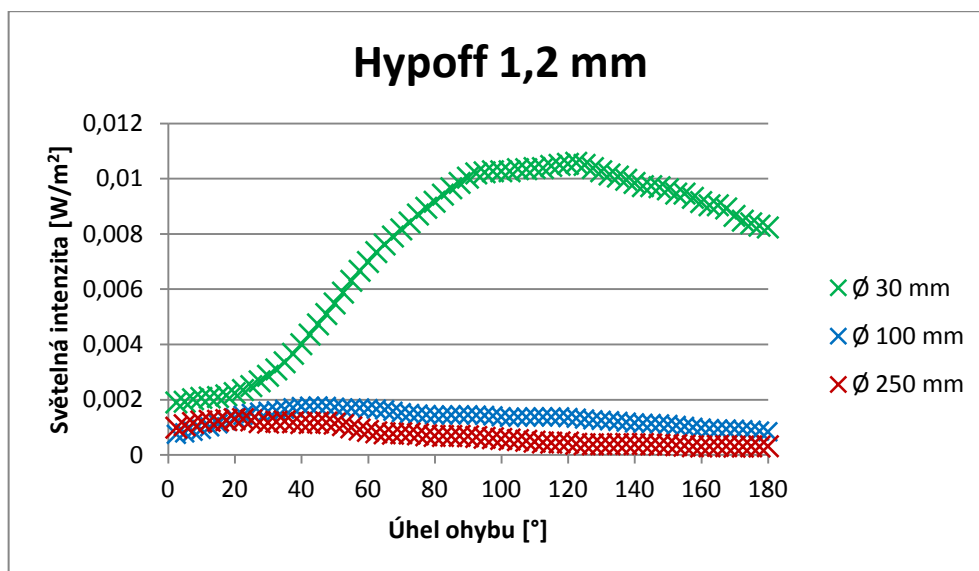
Byla mezi sebou porovnávána optická vlákna Hypoff průměrů 1 a 1,2 mm. Vláknem průměru 1,5 mm dosahuje vyšších hodnot světelné intenzity, než vlákna průměrů 1 a 1,2 mm, proto není zaneseno do grafu na obr. č. 29. Z uvedeného grafu tedy vyplývá, že rozdíl hodnot světelné intenzity mezi vlákny průměru 1 a 1,2 mm je statisticky nevýznamný, protože se meze konfidenčních intervalů překrývají.

Vzdálenost od zdroje světla je závislá na průměru měřeného kotouče, čím má tedy měřený kotouč menší průměr, tím se zkracuje měřená délka optického vlákna. Z důvodu lepší interpretace výsledků je následně světelná intenzita optického vlákna hodnocena v závislosti na úhlu ohybu, jak je znázorněno na obr. č. 30.

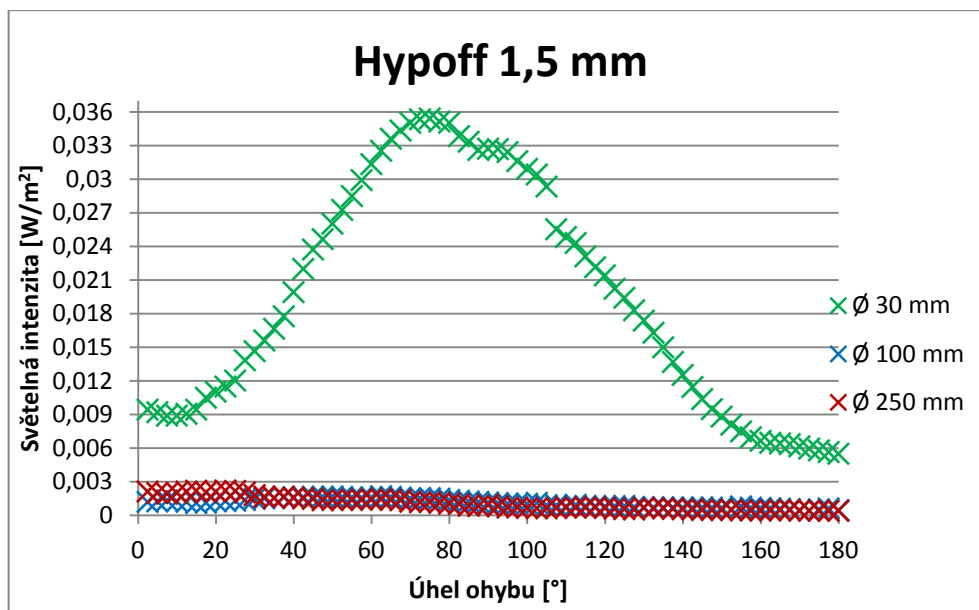
Pro srovnání jsou na obr. 30; 31 a 32 zobrazeny grafy světelné intenzity optických vláken Hypoff průměrů 1; 1,2 a 1,5 mm v ohnutém stavu o kotouče průměrů 30; 100 a 250 mm. Další grafy světelné intenzity optických vláken v ohybu při různých průměrech kotoučů jsou k nahlédnutí v příloze č. 2.



Obr. 30: Světelná intenzita Hypoff 1 mm při ohybu o kotouče různých průměrů



Obr. 31: Světelná intenzita Hypoff 1,2 mm při ohybu o kotouče různých průměrů

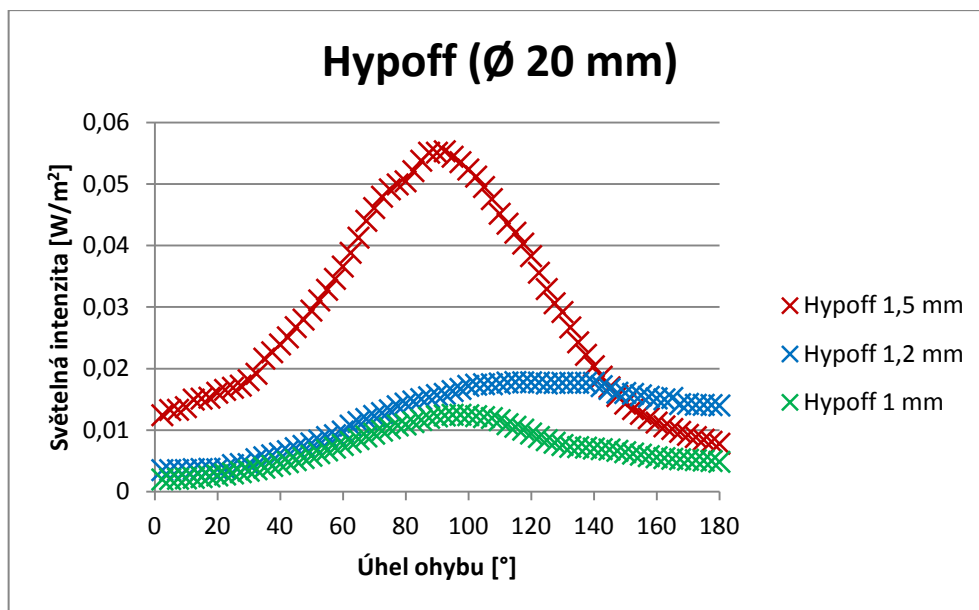


Obr. 32: Světelná intenzita Hypoff 1,5 mm při ohybu o kotouče různých průměrů

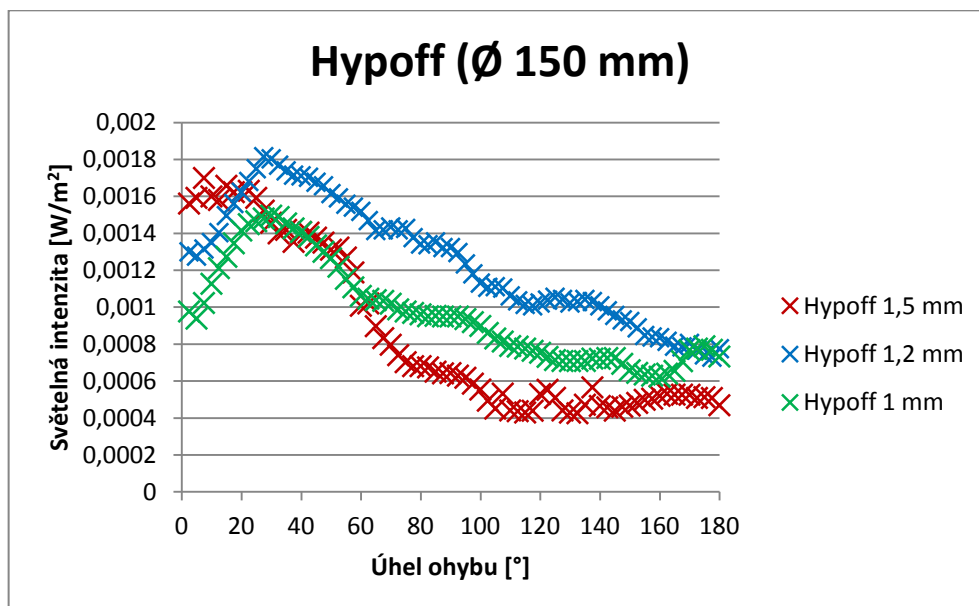
Diskuze výsledků:

Z grafů na obr. 30; 31 a 32 je patrné, že pokud se optické vlákno ohýbá o kotouč menšího průměru, tím dosahuje v místě ohybu vyšších hodnot světelné intenzity. Zde v konkrétním případě u vlákna Hypoff 1 mm, při ohybu o kotouč průměru 30 mm vykazuje vyšší světelnou intenzitu na povrchu vlákna, než je tomu tak u stejného vlákna při ohybu o kotouč průměru 250 mm. Vyšší intenzita při ohybu o kotouč menšího průměru je způsobena překročením kritického poloměru ohybu, kde při vyšším průměru kotouče kritický poloměr ohybu není překročen, proto je zde intenzita nižší. U kotouče o průměru 30 mm je znatelný prudký vzestup světelné intenzity až je právě překročen kritický poloměr ohybu, poté následuje opět prudký pokles intenzity v závislosti na úhlu ohybu.

Na následujících obr. 33 a 34 jsou uvedeny grafy světelné intenzity v ohybu vlákna o kotouče průměrů 20 a 150 mm. Grafy zahrnují porovnání intenzity v závislosti na průměru optického vlákna. Graf zachycující výsledky měření intenzity optických vláken v ohybu o kotouč průměru 40 mm je k nahlédnutí v příloze č. 2.



Obr. 33: Porovnání světelné intenzity při ohybu o kotouč průměru 20 mm



Obr. 34: Porovnání světelné intenzity při ohybu o kotouč průměru 150 mm

Diskuze výsledků:

Z grafu na obr. č. 33 vyplývá, že optická vlákna větších průměrů dosahují vyšších hodnot světelné intenzity i v ohnutém stavu. Zde v konkrétním případě při ohybu vláken o kotouč průměru 20 mm vykazuje nejvyšší světelné intenzity optické vlákno Hypoff průměru 1,5 mm. U tohoto vlákna také dochází k prudkému růstu intenzity a po překročení kritického poloměru zase k poklesu světelné intenzity, oproti vláknům Hypoff průměrů 1 a 1,2 mm, u kterých pokles není tak razantní. Mezi

výsledky světelné intenzity, optických vláken Hypoff průměrů 1 a 1,2 mm, není statisticky významný rozdíl, protože se meze konfidenčních intervalů překrývají. Vláknem průměru 1,5 mm vykazuje vyšší intenzitu, to znamená, že oproti vláknům průměrů 1 a 1,2 mm je rozdíl statisticky významný. Jak již bylo zmiňováno, u tohoto vlákna intenzita prudce klesá, v závěru měřené délky již toto vlákno dosahuje přibližně stejných výsledků jako dvě zbylá vlákna. V závěru měřené délky již tedy rozdíly mezi světelnou intenzitou vláken Hypoff průměrů 1; 1,2 a 1,5 mm při ohybu o kotouč průměru 20 mm nejsou statisticky významné, protože se překrývají meze konfidenčních intervalů všech měřených optických vláken. Graf světelné intenzity včetně konfidenčních intervalů vláken Hypoff průměrů 1; 1,2 a 1,5 mm při ohybu o kotouč průměru 40 mm je k nahlédnutí v příloze č. 2.

Graf na obr. č. 34 zachycuje světelnou intenzitu u stejných optických vláken jako v předešlém případě, ovšem při ohybu o kotouč průměru 150 mm. Optické vlákno Hypoff průměru 1,5 mm opět vykazuje vyšší světelnou intenzitu, avšak pouze v počátku měřené délky při úhlu ohybu do 20°, poté intenzita prudce klesá v závislosti na úhlu ohybu. U vláken Hypoff průměrů 1 a 1,2 mm je trend opačný. V počátku měřicí délky, tedy při malém úhlu ohybu světelná intenzita stoupá, až se v případě vlákna průměru 1 mm dostane k hodnotám intenzity vlákna průměru 1,5 mm (vlákno průměru 1,2 mm dokonce vykazuje ještě vyšší hodnoty) a poté pozvolně klesá. Rozdíly mezi výsledky světelné intenzity, při ohybu o kotouč průměru 150 mm, všech vláken, jsou statisticky nevýznamné. Byly zkonstruovány konfidenční intervaly, kde dolní i horní meze intervalů se překrývají. Graf světelné intenzity včetně konfidenčních intervalů vláken Hypoff průměrů 1; 1,2 1,5 mm při ohybu o kotouč průměru 150 mm je k nahlédnutí v příloze č. 2.

Obecně je tedy z grafů patrné, že při měření světelné intenzity v ohybu je velmi důležitým parametrem nejen průměr měřeného vlákna, ale také průměr používaného kotouče. Proto je vhodné tyto dva parametry dále zkoumat.

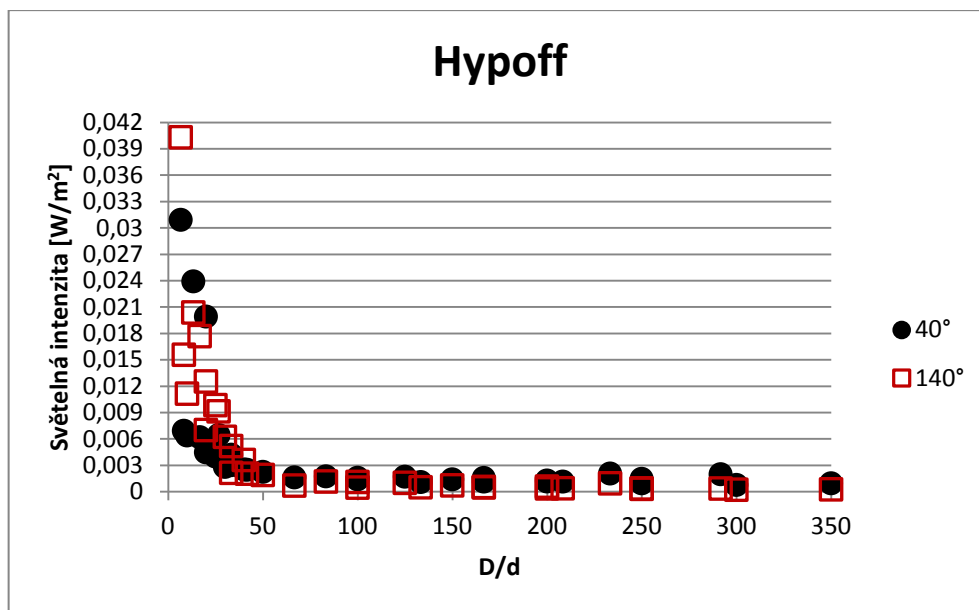
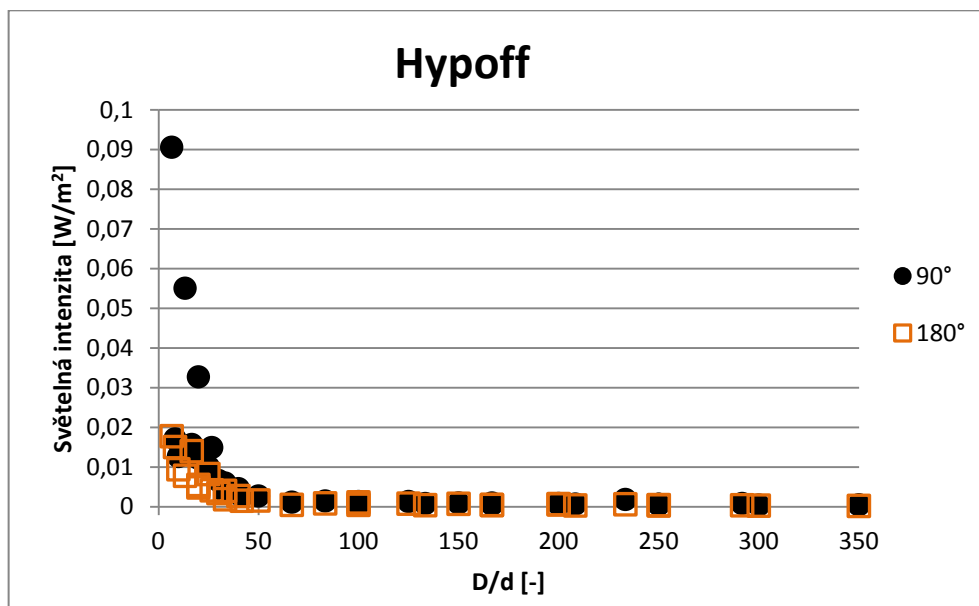
2.4.1 Vliv podílu průměru vlákna a měřeného kotouče na světelnou intenzitu

V předchozím hodnocení bylo zjištěno, že na světelnou intenzitu optického vlákna v ohybu má vliv nejen průměr vlákna, ale také průměr použitého kotouče. Z tohoto důvodu byla zvolena metoda vyhodnocování s přihlédnutím na oba zmíněné parametry. Světelná intenzita optického vlákna v ohybu je sledovaná v závislosti na podílu průměru používaného kotouče D a průměru vlákna d . V tab. č. 6 jsou uvedeny výsledné hodnoty podílu D/d .

Tabulka 6: Výsledné hodnoty podílu D/d

D/d		Průměr vlákna [mm]		
		1	1,2	1,5
Průměr kotouče [mm]	10	10	8,33	6,67
	20	20	16,7	13,3
	30	30	25	20
	40	40	33,3	26,7
	50	50	41,7	33,3
	100	100	83,3	66,7
	150	150	125	100
	200	200	167	133
	250	250	208	167
	300	300	250	200
	350	350	292	233

V následujících grafech jsou uvedeny výsledky světelné intenzity v závislosti na podílu D/d v různých úhlech ohybu. Další grafy jsou k nahlédnutí v příloze č. 2.

Obr. 35: Světelná intenzita v závislosti na D/d Obr. 36: Světelná intenzita v závislosti na D/d **Diskuze výsledků:**

Na obr. 35 a 36 jsou zobrazeny grafy světelné intenzity v závislosti na podílu D/d při úhlech ohybu 40° ; 90° ; 140° a 180° .

Graf, na kterém je znázorněna světelná intenzita optických vláken v závislosti na podílu D/d při úhlu ohybu 40° a 140° , odpovídá předpokládanému trendu, kde tedy s rostoucím průměrem kotouče klesá intenzita vyzařování. Tímto byly potvrzeny

poznatky z předchozího experimentu. Zajímavostí je fakt, že při menším průměru kotouče je světelná intenzita vyšší při větším úhlu ohybu. Zde v konkrétním případě, u kotouče průměru 10 mm dosahuje intenzita vyšších hodnot při úhlu ohybu 140° . Při ohýbání o menší průměr kotouče tedy dochází k překročení kritického poloměru ohybu a následnému vyzařování paprsků světelné intenzity ven z vlákna. U kotoučů větších průměrů při úhlu ohybu 140° již světelná intenzita dosahuje přibližně stejných, případně nižších hodnot světelné intenzity jako při úhlu ohybu 40° .

Obr. č. 36 zobrazuje vliv závislosti světelné intenzity optických vláken na podílu D/d při úhlech ohybu 90° a 180° . Tento graf je zde uveden z důvodu porovnání s předchozím grafem. Při úhlu ohybu 90° optická vlákna ohnutá o kotouč průměru 10 mm vykazují nejvyšší míru vyzařování. To znamená, že i v tomto případě byl potvrzen obecný předpoklad pokles světelné intenzity s rostoucím průměrem kotouče. Měření intenzity při úhlu ohybu 90° odpovídá poloviční měřené délky. U úhlu ohybu 180° je již měření prováděno na konci měřené délky, proto je zde světelná intenzita nejnižší.

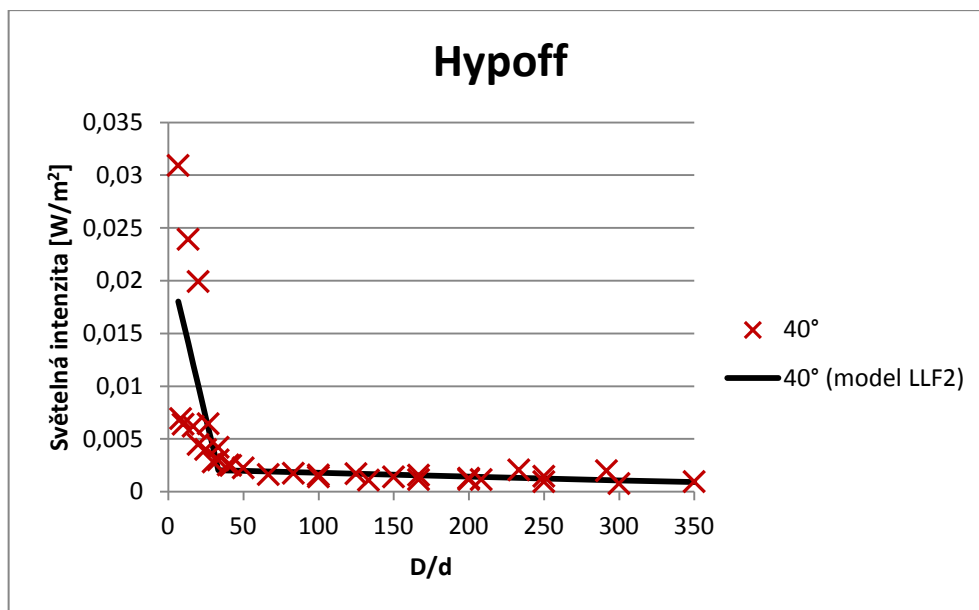
2.4.2 Světelná intenzita v ohybu optických vláken dle metody LLF2

Podrobný popis využívané metody LLF2 byl již uveden v kapitole 2.3.2. Postup vyhodnocování je i v tomto případě stejný, pouze se změnila vstupní data s ohledem na využití podílu D/d a úhlu ohybu optického vlákna.

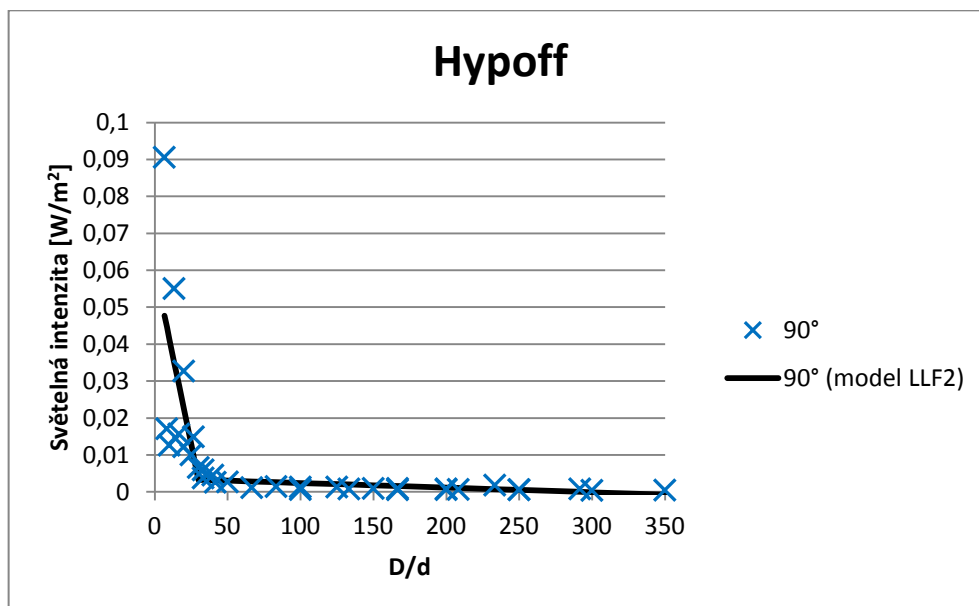
Vstupní data: hodnoty x - podíl průměru kotouče D a průměru optického vlákna d [mm],

- hodnoty y - světelná intenzita optických vláken v ohnutém stavu [W/m^2].

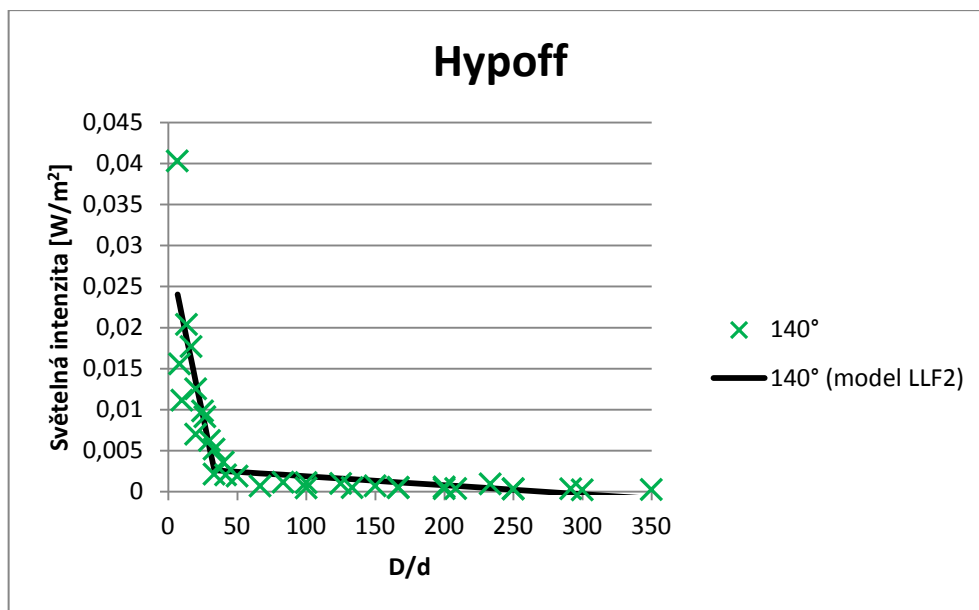
Uvedená metoda byla aplikována na výsledky světelné intenzity v závislosti na podílu D/d při úhlech ohybu 40° ; 90° a 140° a zaneseno do grafů, jak je zobrazeno na následujících obr. č. 37; 38 a 39.



Obr. 37: Světelná intenzita v závislosti na D/d - model LLF2 při úhlu ohybu 40°

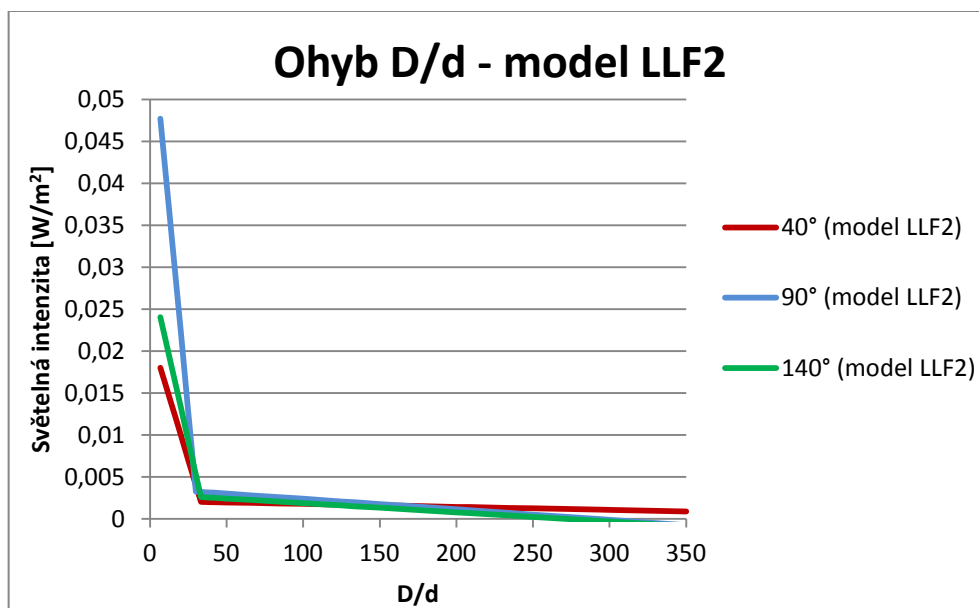


Obr. 38: Světelná intenzita v závislosti na D/d - model LLF2 při úhlu ohybu 90°



Obr. 39: Světelná intenzita v závislosti na D/d - model LLF2 při úhlu ohybu 140°

Na obr. č. 40 jsou graficky vyjádřeny vyhlazené přímky dle metody LLF2 v závislosti na podílu D/d , aby bylo možné je porovnat mezi sebou v různých úhlech ohybu.



Obr. 40: Světelná intenzita v závislosti na D/d - model LLF2 při úhlech ohybu 40°, 90° a 140°

Diskuze výsledků:

Graf na obr. č. 37 zachycuje vyjádření světelné intenzity optických vláken a podílu D/d při úhlu ohybu 40° společně s vyhlazením metodou LLF2. Z grafu je

patrné, že při malém průměru kotouče je intenzita vyzařování nejvyšší. V případě vyhlazení metodou LLF2 bylo toto tvrzení dokázáno, malý průměr kotouče vykazuje vyšší intenzitu, poté však s rostoucím průměrem kotoučem intenzita klesá, až se dostane do rovnovážného stavu. Z modelu LLF2 lze také vyčíst, že při malém podílu D/d dochází k vychýlení hodnot mimo přímku modelu LLF2. Protože se jedná o hodnoty intenzity vyzařování vláken Hypoff průměrů 1; 1,2 a 1,5 mm při ohybu o kotouč 10 mm (tedy měřený kotouč s nejmenším průměrem) je vychýlení hodnot pravděpodobně způsobeno právě překročením kritického poloměru ohybu vlákna.

V grafu na obr. č. 38 je tedy opět vyjádřená světelná intenzita optických vláken v závislosti na podílu D/d při úhlu ohybu vlákna 90° . V tomto případě také dochází k vychýlení hodnot mimo přímku vyhlazení metodou LLF2. Tentokrát jsou vychýlené již pouze dvě hodnoty, opět u nejmenšího průměru kotouče 10 mm u optických vláken Hypoff průměrů 1,2 a 1,5 mm. To znamená, že při úhlu ohybu 90° na kotouči průměru 10 mm vlákno Hypoff průměru 1 mm nepřekračuje kritický poloměr ohybu.

Na obr. č. 39 je uveden graf zobrazující světelnou intenzitu optických vláken v závislosti na podílu D/d při úhlu ohybu 140° . U tohoto příkladu dochází k vychýlení hodnot od modelu LLF2, stejně jako v předchozích případech. Zde se jedna už pouze o jednu hodnotu, konkrétně je to světelná intenzita optického vlákna Hypoff průměru 1,5 mm při kotouči průměru 10 mm.

Z grafu na obr. č. 40 lze vyčíst, že při úhlu ohybu 90° dosahuje intenzita při nejmenším průměru kotouče nejvyšších hodnot, poté se světelná intenzita při zvyšujícím se úhlu ohybu snižuje. Toto je způsobeno především překročením kritického úhlu ohybu a také vlivem průměru kotouče, o které se vlákno ohýbá.

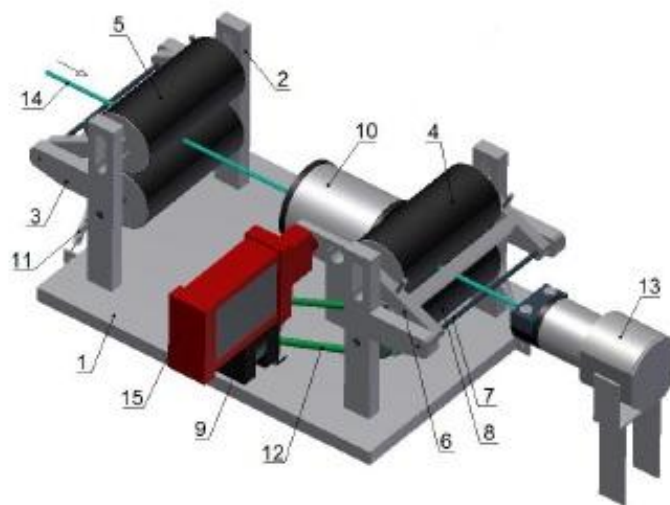
Metoda LLF2 byla na data světelné intenzity optických vláken v ohybu poprvé použita právě v této práci, pouze na uvedených třech příkladech, proto by bylo vhodné provést další zkoumání této metody. Sledovat závislost podílu D/d na úhlech ohybu by mohlo být námětem další práce.

3. Vlastní návrh odtahového zařízení

Při experimentálním měření na přístroji POFIN1 (tedy při měření světelné intenzity v napřímeném stavu) často docházelo k velmi rozdílným výsledkům měření, proto se tato měření opakovala. Tyto rozdíly byly způsobené manuálním odtahem zdroje světla od přístroje POFIN1, proto byla navržnuta následující řešení.

3.1 Současný stav

Na přístroji POFIN1 se měří světelná intenzita stranově vyzařujících optických vláken v napřímeném stavu. Přístroj POFIN1 je zobrazen na obr. č. 41. Optické vlákno, které má již upravený příčný řez, (viz. kapitola 2.1.) je protaženo příváděcími válečky, dále skrze měřicí tunel až k odváděcím válečkům, kde je následně navedeno ke zdroji světla (podrobnější popis přístroje v kap. 1.11.1).

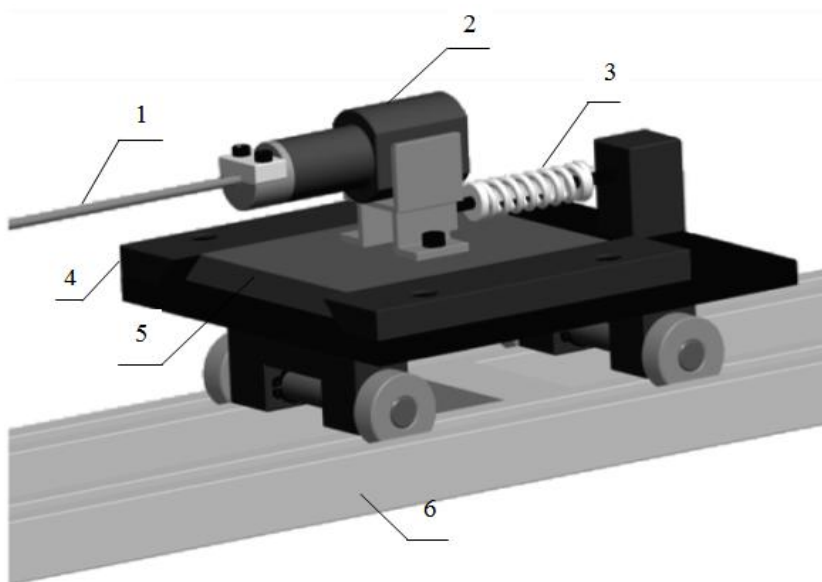


Obr. 41: Přístroj měřící světelnou intenzitu optických vláken v napřímeném stavu- POFIN 1

1- základní deska; 2- sloupky (4x); 3- konzole; 4- odváděcí válečky; 5- příváděcí válečky; 6- přítlačná páka válečku; 7- uložení páky; 8- hnací odtahový váleček; 9- krokový motor; 10- měřicí tunel; 11- tažné pružiny; 12- hnací řemen; 13- zdroj světla; 14- optické vlákno; 15- senzor světelné intenzity.

V současné době není zajištěno automatické odtahové zařízení, zdroj světla je umístěn na podstavci. Odtah je prováděn manuálně, to znamená, že laborant musí vždy po každém kroku krokového motoru sám posunout podstavec se zdrojem světla. Tento postup je nevyhovující z více důvodů, hlavním je, že u optického vlákna není dosaženo neustálého napřímění. V případě, že vlákno není napříměné, může se prověšovat a tím dochází k lámání paprsků uvnitř vlákna a následnému proniknutí paprsků ven z vlákna. Navíc touto metodou dochází k nepřesným výsledkům světelné intenzity v závislosti na práci měřícího laboranta. Výhodou je, že je zde vysoká variabilita měřené délky. Na základě těchto poznatků bylo uvažováno o návrhu automatického odtahového zařízení ke stávajícímu přístroji POFIN1. Byly zhotoveny čtyři návrhy modelů odtahového zařízení, jak je uvedeno v následujícím textu. Rozdílné varianty jsou prozatím pojmenovány pouze pracovními názvy.

Nejprve byl navrhnut vozík, na který se umístí zdroj světla. Vozík je zobrazen na následujícím obr. č. 42. Optické vlákno je přivedeno ke zdroji světla, který je připevněn k distanční plošině na vozíku. Napřímění optického vlákna je zajišťováno stabilizační pružinou. Vozík je opatřen hliníkovými kolečky a umístěn na kolejnici. Vozík je následně upravován dle jednotlivých variant.

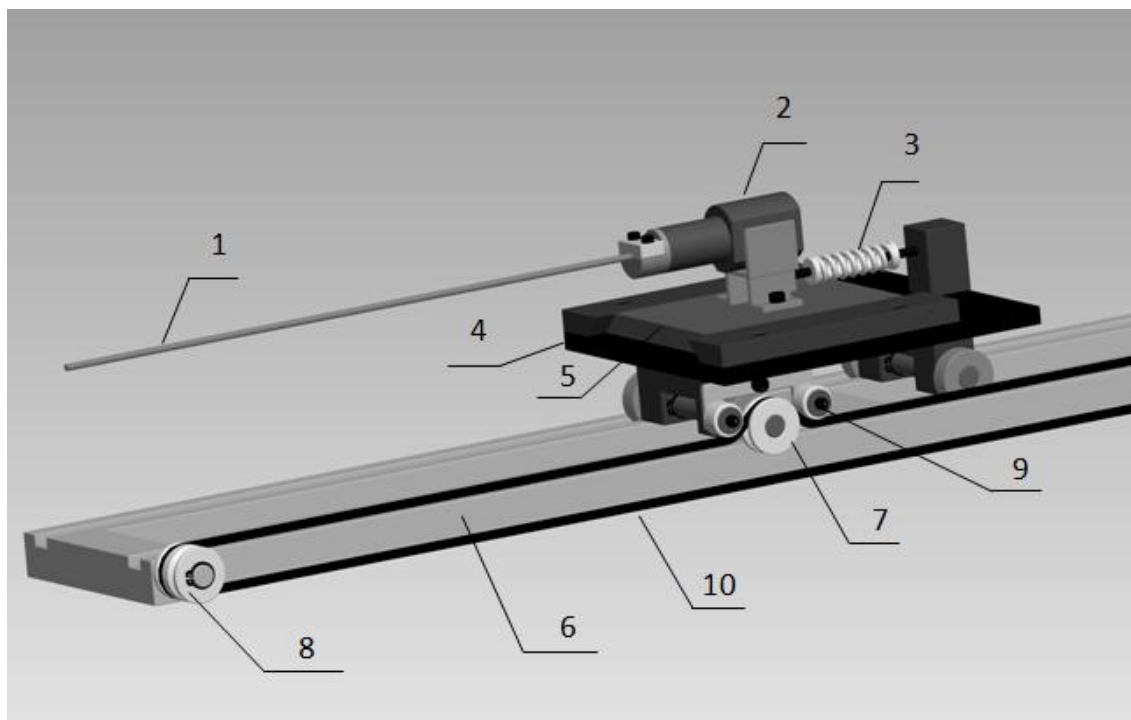


Obr. 42: Návrh vozíku odtahového zařízení

1- optické vlákno; 2- zdroj světla; 3- pružina; 4- vozík; 5- distanční plošina; 6- kolejnice.

3.1.1 Varianta 1- Odtah pomocí stávajícího krokového motoru

Tento návrh využívá již stávajícího krokového motoru, který je umístěn na měřicím zařízení (viz. obr. č. 41). Na začátku a na konci kolejnice jsou připevněny řemenice. Stejná řemenice je umístěna i na vozíku, zde jsou navíc připojeny dva přítlačné válečky. Samotný pohon zajišťuje řemen, který tedy prochází od první řemenice na začátku kolejnice k řemenici na konci kolejnice, až k hnané řemenici na vozíku. Na začátku kolejnice je použita dvojitá řemenice, která díky řemenu vedoucímu od krokového motoru zajišťuje pohon. Tato metoda je však omezena měřenou délkou. Užíváme jeden řemen délky kolejnice, proto se zde měřená délka nemůže měnit. Další nevýhodou této varianty je fakt, že po určité době používání se bude řemen prověšovat, což povede k nepřesnému měření. Z hlediska přesunu zařízení je tato metoda také nevyhovující, musí se vždy sundat řemen, případně přesunout celý měřicí přístroj i s odtahovým zařízením. Návrh tohoto zařízení je zobrazen na obr. č. 43.

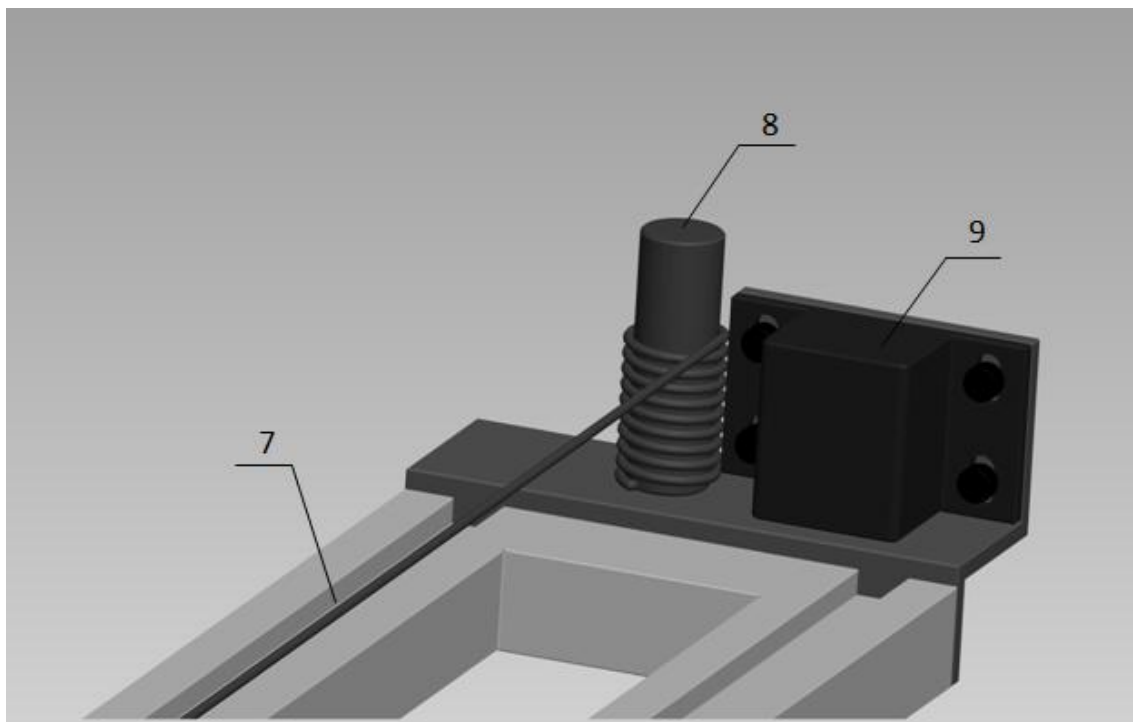


Obr. 43: Návrh – odtah pomocí stávajícího krokového motoru

1- optické vlákno; 2- zdroj světla; 3- pružina; 4- vozík; 5- distanční plošina; 6- kolejnice; 7- řemenice; 8- dvojitá řemenice; 9- přítlačné válečky; 10- řemen

3.1.2 Varianta 2- Odtah pomocí navijáku

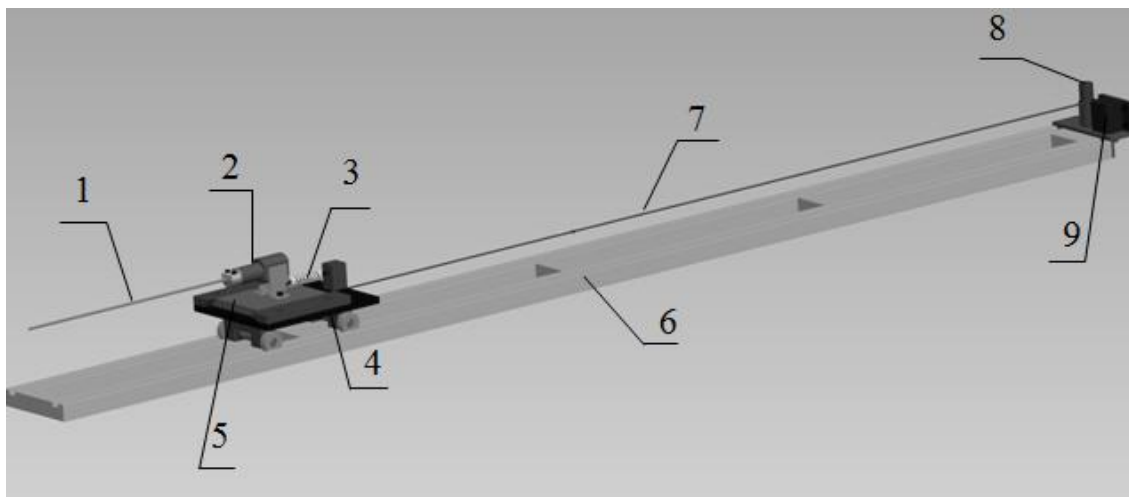
U této varianty je odtah zajišťován navíjecím kolíkem a tažným lankem. K pojízdnému vozíku je připevněno tažné lanko, které se na konci měřené délky ovíjí na navinovací kolík. Navíjecí kolík tedy přitahováním tažného lanka posouvá vozík se zdrojem světla po kolejnici. Samotný pohyb navíjecího kolíku je zajištěn krokovým motorem, jak je uvedeno na obr. č. 44.



Obr. 44: Návrh- odtah pomocí navijáku- detail navíjecího kolíku

7- tažné lanko; 8- navíjecí kolík; 9- krokový motor.

Výhodou tohoto návrhu jsou z finančního hlediska nízké náklady na výrobu pouze navíjecího kolíku a tažného lanka. Navíc je krokový motor umístěn mimo vozík. Ovšem nevýhodou této varianty je omezení měřené délky optického vlákna. Další nevýhoda je způsobena právě tažným lankem, které po každém kroku nemusí být dostatečně napnuto, což by způsobilo nepřesný pohyb vozíku. Tato varianta je zobrazena na obr. č. 45.

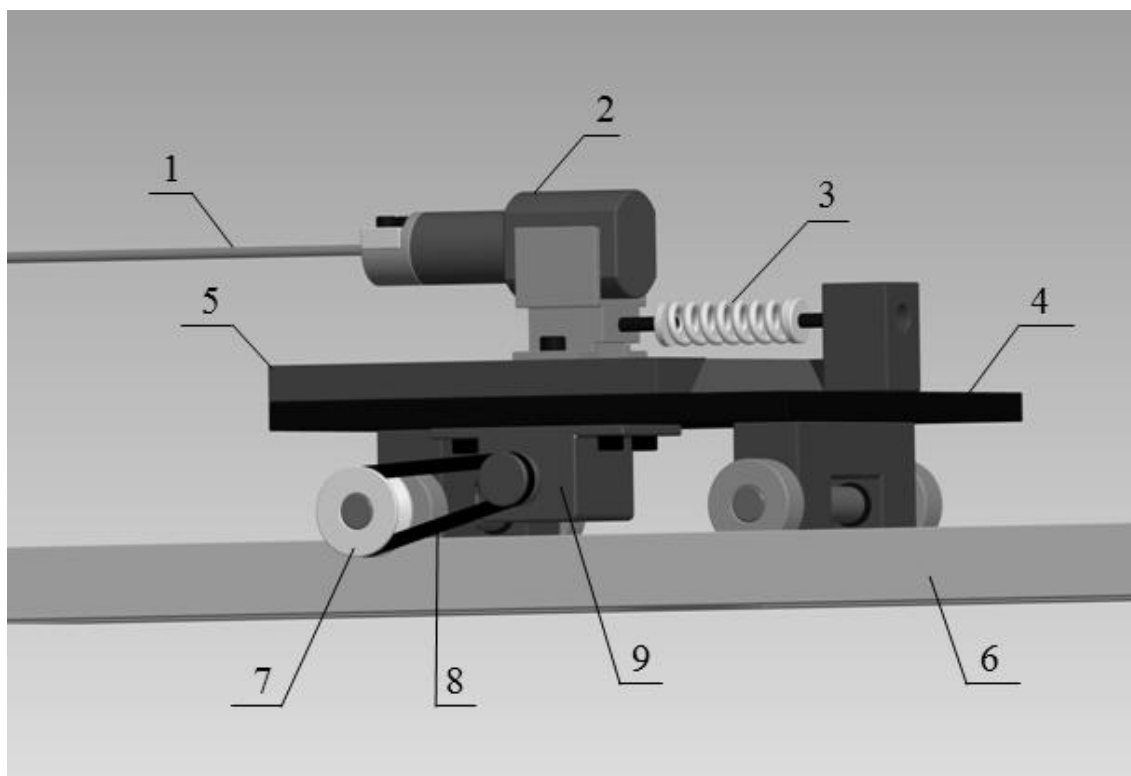


Obr. 45: Návrh- odtah pomocí navijáku

1- optické vlákno; 2- zdroj světla; 3- pružina; 4- vozík; 5- distanční plošina; 6- kolejnice; 7- tažné lanko; 8- navíjecí kolík; 9- krokový motor.

3.1.3 Varianta 3- Odtah pomocí řemenice

U této varianty je krokový motor, který zajišťuje samotný pohyb odtahu, umístěn na spodu vozíku. K hliníkovému kolečku na jedné straně vozíku byla připojena řemenice. Na stejné straně vozíku je ke krokovému motoru připevněn výstupek kruhového tvaru s drážkou. Řemen je tedy napnut okolo řemenice na výstupku na krokovém motoru. Díky hnací řemenici je dosaženo přesnějšího měření (např. než u varianty 2). Tato varianta není omezena měřenou délkou, záleží pouze na délce kolejnic. Navíc se s tímto zařízením lépe manipuluje v případě potřeby přesunu. Návrh je zobrazen na obr. č. 46.

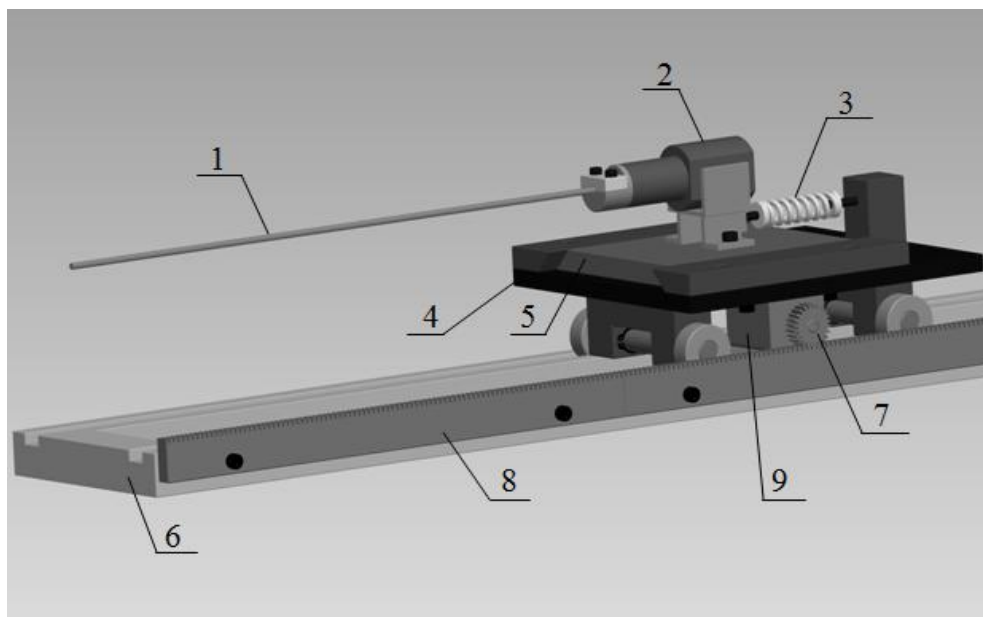


Obr. 46: Návrh- odtah pomocí řemenice

1- optické vlákno; 2- zdroj světla; 3- pružina; 4- vozík; 5- distanční plošina; 6- kolejnice; 7- řemenice; 8- řemen; 9- krokový motor.

3.1.4 Varianta 4- Odtah pomocí ozubeného kola

Pro tento typ bylo zapotřebí upravit vozík a kolejnici. Zespodu vozíku byl umístěn krokový motor (jako u předchozí varianty), ke kterému bylo připevněno ozubené kolo. Ke kolejnici byl přišroubován ozubený hřeben. Odtah je zde tedy zajištěn posouváním (valením) ozubeného kola po ozubeném hřebenu. Tato varianta opět není omezena měřicí délkou, protože ozubený hřeben můžeme připevnit po celé délce kolejnice, případně kolejnici a hřeben prodloužit. U tohoto návrhu můžeme právě díky ozubenému kolu a hřebenu dosahovat velmi přesného měření. Nevýhodou je jistě daleko nákladnější výroba, případně vyšší náklady na zařízení. Odtah pomocí ozubeného kola je zobrazen na obr. č. 47.



Obr. 47: Návrh- odtah pomocí ozubeného kola

1- optické vlákno; 2- zdroj světla; 3- pružina; 4- vozík; 5- distanční plošina; 6- kolejnice; 7- ozubené kolo; 8- ozubený hřeben; 9- krokový motor.

Závěrečné zhodnocení:

Z uvedených návrhů odtahového zařízení pro stávající přístroj pro měření světelné intenzity v napřímeném stavu, se jeví jako nejpřesnější varianta č. 4, tj. s ozubeným kolem. Díky této metodě bychom získali nejpřesnější výsledky, avšak nevýhodou je vyšší pořizovací cena. Oproti variantám kde jsou použity řemenice s řemeny, je varianta č. 4 výhodnější i z hlediska údržby. Navíc řemen se po určitém čase začne prověšovat (tím dochází k nepřesným výsledkům) a je zapotřebí ho měnit častěji, než ozubené kolo případně ozubený hřeben.

Závěr

Diplomová práce se zabývá měřením světelné intenzity stranově vyzařujících optických vláken v napřímeném stavu a v ohybu a následným vyhodnocováním naměřených dat. Měření bylo prováděno na optických vláknech různých průměrů, poskytnutých firmou Grace a Hypoff.

Na základě výsledků z experimentální části lze potvrdit obecný předpoklad, že světelná intenzita optických vláken s rostoucí vzdáleností od zdroje světla klesá. Tato hypotéza byla potvrzena na měření světelné intenzity jak v napřímeném stavu, tak i v ohybu optických vláken.

V případě měření světelné intenzity v napřímeném stavu optických vláken byla data dále zpracovávána pomocí dvou metod, které se lišily způsobem vyhlazení dat. Při použití první metody 1 bylo zjištěno, že zcela nevyhovuje požadovaným nárokům. U vláken větších průměru (např. 1 -3 mm) byl zaznamenán prudký pokles intenzity v blízké vzdálenosti od zdroje světla a nepřesný odhad hodnoty světelné intenzity na vstupu do vlákna. Proto byly výsledky měření dále vyhodnocovány druhou metodou LLF2.

Pomocí metody LLF2 bylo již dosaženo přesnějšího odhadu světelné intenzity v nulové vzdálenosti od zdroje světla a průměrné rychlosti útlumu. S použitím metody LLF2 již tyto parametry odpovídají skutečnosti. V případě této metody byl prudký pokles intenzity v blízké vzdálenosti od zdroje světla zaznamenán již pouze u vláken největších průměrů (např. 3 mm), což by mohlo být způsobeno špatným navedením vlákna ke zdroji světla.

Pracovní délka optického vlákna byla také posuzována prostřednictvím obou metod. V tomto případě se lepšími výsledky vykazuje metoda 1. U metody LLF2 dosahovala testovaná optická vlákna daleko nižších hodnot pracovní délky, než u metody 1.

Při zkoumání vlivu průměru vlákna na hodnotu světelné intenzity bylo zjištěno, že s rostoucím průměrem vlákna stoupá i světelná intenzita. Z hlediska pracovní délky,

vlákna větších průměrů dosahují vyšších hodnot světelné intenzity, avšak v závislosti na vzdálenosti od zdroje světla dochází k prudkému útlumu intenzity. Optická vlákna menších průměrů sice vykazují nižší hodnoty světelné intenzity, avšak s rostoucí vzdáleností od zdroje světla dochází pouze k pozvolnému poklesu intenzity.

Optická vlákna stejných průměrů, vyrobená rozdílnými výrobci, byla porovnávána mezi sebou v závislosti na dosažených hodnotách světelné intenzity v napřímeném stavu. Rozdíl mezi naměřenými výsledky obou vláken je statisticky nevýznamný, protože u zkonstruovaných konfidenčních intervalů se jejich horní a dolní meze překrývali.

Měření světelné intenzity optických vláken v ohybu bylo provedeno na třech vláknech různých průměrů, poskytnutých firmou Hypoff. I v tomto případě byl zachován předpoklad, větší průměr vlákna znamená vyšší hodnoty světelné intenzity. Ohyb vlákna byl realizován pomocí kotoučů o různých průměrech. Měřením bylo zjištěno, že průměr kotouče, o které se vlákno ohýbá, zásadně ovlivňuje výslednou světelnou intenzitu v místě ohybu a dále ve vzdálenosti od místa ohybu až na konec měřené délky. Z experimentálních výsledků lze vyvodit, že vlákno ohýbané o kotouč menšího průměru vykazuje v místě největšího ohybu vyšší světelnou intenzitu, než stejné vlákno ohýbané o kotouč většího průměru.

Světelná intenzita byla dále sledována z hlediska podílu průměru kotouče a průměru vlákna (D/d) v závislosti na úhlu ohybu vlákna. U vláken, která se ohýbala o kotouč o menším průměru, dosahuje světelná intenzita vyšších hodnot až při větším úhlu ohybu (např. 140°) a poté opět dochází k prudkému útlumu intenzity. Vlákna ohýbaná o kotouč o větším průměru vykazují vyšší hodnoty světelné intenzity již při menším úhlu ohybu a posléze dochází pouze k mírnému poklesu intenzity.

Světelná intenzity měřená v ohybu vlákna byla také hodnocena metodou LLF2 a to v závislosti na podílu D/d . V případě vyhlazení naměřené intenzity v ohybu vlákna dochází při této metodě k vychýlení počátečních hodnot. Z důvodu prvního použití metody LLF2 na intenzitu v ohybu v této práci bylo doporučeno její další zkoumání.

Byla zhodnocena metoda měření světelné intenzity na přístroji POFIN 1 a bylo zjištěno, že manuálně zajištěný odhad vede k nepřesným výsledkům a experiment se musí často opakovat. Proto byly navrženy čtyři varianty odtahového zařízení. Z uvedených návrhů bylo z hlediska požadavku dosažení nejpřesnějšího měření doporučeno odtahové zařízení řešené pomocí ozubeného kola.

Seznam použité literatury

- [1] DOLEČEK, J.: *Moderní učebnice elektroniky: 3. Díl: Optoelektronika a optoelektronické prvky*. vyd. Praha: Ben- technická literatura, 2005. ISBN 80-7300184-5
- [2] Zrození vláknové optiky, získáno dne: 10.6.2013. Dostupné z: <http://inventors.about.com/library/weekly/aa980407.htm>
- [3] KŘEMENÁKOVÁ, D., MILITKÝ, J.: *Textilie v novém tisíciletí- využití optických vláken v textiliích (přednáška)*, Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2010
- [4] Odraz a lom světla, získáno dne: 21. 3. 2013. Dostupné z: http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/02_odraz_a_lom/02_odraz.htm
- [5] VLČEK, J.: *Základy elektrotechniky*. Praha: Jiří Vlček, 2006, 223 str.
- [6] Výroba a vlastnosti optických vláken, získáno dne: 6. 5. 2013. Dostupné z: <http://martin.feld.cvut.cz/~mach/vyuka/X13MTV/Opticka%20vlakna.pdf>
- [7] BEJČEK, L., ŠEDIVÁ, S.: *Vláknová optika- návody laboratorních cvičení*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003.
- [8] HÁJEK, J.: *Přenosové a spojovací systémy (přednáška)*, Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010.
- [9] SVOBODA, J. a kol.: *Telekomunikační technika: Díl 1. Zprávy, signály, přenosová prostředí*. 2. vydání. Praha: Sdělovací technika, 2000. ISBN 80-901936-3-3.
- [10] BOHÁČ, L.: *Optické komunikace (přednáška)*, Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011

- [11] ŠAVEL, J.: *Elektrotechnologie: Materiály a technologie v elektronice a elektrotechnice*. 1. vydání. Praha: Ben- technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-75-9.
- [12] MLEZIVA, J., ŠŇUPÁREK, J.: *Polymery: Výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. vydání. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.
- [13] ŠUTA, M.: *Chemické látky v životním prostředí a zdraví*. 1. vyd. Brno: ZO ČSOP Veronica, 2008. ISBN 978-80-87308-00-4. Dostupná online verze: http://www.veronica.cz/dokumenty/chemicke_latky.pdf
- [14] BOHÁČ, L., LUCKI, M.: *Optické komunikační systémy*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010. ISBN 978-80-01-04484-1.
- [15] JAROŠ, P.: *Optické spoje a jejich vliv na přenos*, Brno 2011, Bakalářská práce- fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně, Vedoucí bakalářské práce Vladimír Tejkal.
- [16] NOVOTNÝ, K., MARTAN, T., ŠÍSTEK, J.: *Systémy pro optické komunikace*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2007, ISBN 978-80-01-02810-0.
- [17] BUBELA, O.: *Plastová optická vlákna a jejich aplikace v praxi*, Brno 2010, Bakalářská práce- fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně, Vedoucí bakalářské práce Šporik Jan.
- [18] KŘEMENÁKOVÁ, D., MILITKÝ J., ŠESTÁK J.: *Vláknenné struktury pro speciální aplikace*. 1. vyd., O.P.S. Kanina, 2013. ISBN 978-80-87 269-32-9.
- [19] UHLÁŘ, T.: *Aktivní monitoring optických přenosových tras*, Praha 2005, Vysoké učení technické v Praze
- [20] NOVOTNÝ, K.: *Optická komunikační technika*. Vyd. 3. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2007, ISBN 978-80-01-03920-5.

- [21] Encyklopedie fyziky, získáno dne: 29. 10. 2013. Dostupné z:
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/535-fotometricke-veliciny>
- [22] MERYOVÁ, B.: *Měření intenzity vyzařování optických vláken*, Liberec 2012, Diplomová práce- fakulta textilní Technické univerzity v Liberci, Vedoucí diplomové práce Křemenáková Dana.
- [23] Interní norma č. IN 21-601-01/01- Měření intenzity vyzařování ve vzdálenosti od zdroje světla pro stranově vyzařující optická vlákna, svazky vláken a textilie se zabudovanými optickými vlákny, Liberec: Technická univerzita v Liberci.
- [24] Interní norma č. IN 21-602-01/01- Měření intenzity vyzařování jako funkce vzdálenost od zdroje světla při definovaném ohybu optického vlákna, Liberec: Technická univerzita v Liberci.
- [25] Endruweit, A., Long, A.C., Johnson, M.S.: Textile Composites with embedded optical fibers. Quantification of bending losses in transmitted light intensity using a Monte Carlo Ray-Tracing Metod. 8th International Conference on Textile Composites (TEXCOMP-8), Nottingham, UK, 16-18 Oct 2006.
- [26] Křemenáková, D., Meryová, B., Militký, J., Lédl, V.: Illumination Intensity Changes of Side Emitting Polymer Optical Fibers. 19th Conference STRUTEX 2012 Faculty of Textile Engineering Technical University of Liberec Czech rep.
- [27] Optická vlákna, získáno dne: 15. 4. 2013. Dostupné z:
<http://www.scinet.cz/nobelova-cena-za-fyziku-opticka-vlakna-diky-nimz-je-internet-internetem-a-technologie-ccd-i-ve-vasich-fotacich.html>
- [28] Snellův zákon, získáno dne: 3. 10. 2013. Dostupné z:
http://technet.idnes.cz/zakladni-kamen-kazdeho-fotaku-jak-vznika-obraz-v-objektivu-pan-/tec_foto.aspx?c=A071025_103506_tec_foto_jlb
- [29] Princip indukčního ohřevu, získáno dne: 20. 9. 2013. Dostupné z:
www.comtel.cz/files/download.php?id=2562

Seznam tabulek

Tabulka 1: Průměry testovaných optických vláken	38
Tabulka 2: Parametry optických vláken typu Grace	39
Tabulka 3: Parametry optických vláken typu Flexi	39
Tabulka 4: Parametry $P(0)$ a α_L	43
Tabulka 5: Hodnoty skutečné měřené délky a skutečné délky kroku	57
Tabulka 6: Výsledné hodnoty podílu D/d	63

Seznam obrázků

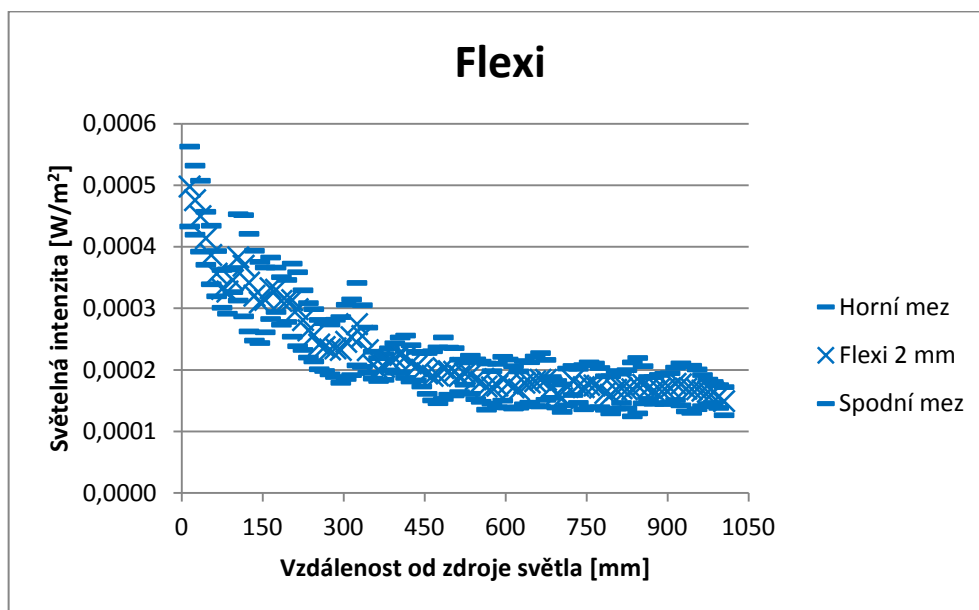
Obr. 1: Optická vlákna [27]	14
Obr. 2: Složení optického vlákna [1]	17
Obr. 3: Snellův zákon [28].....	18
Obr. 4: Princip indukčního ohřevu [29].....	20
Obr. 5: Vid v napřímeném optickém vlákně [22]	28
Obr. 6: Vid v ohnutém optickém vlákně [22]	29
Obr. 7: Přenos světla v závislosti na úhlu ohybu vlákna, poloměr ohybu 4 mm [18]	30
Obr. 8: Ztráty způsobené mikroohmy [10]	31
Obr. 9: Jednovidové optické vlákno [8].....	32
Obr. 10: Mnohovidové optické vlákno se skokovou změnou indexu lomu [8].....	33
Obr. 11: Mnohovidové optické vlákno s gradientní změnou indexu lomu [8].....	34
Obr. 12: Zařízení POFIN1 pro měření světelné intenzity stranově vyzařujících optických vláken v napřímeném stavu [22]	36
Obr. 13: Zařízení pro měření světelné intenzity v ohybu optického vláken [22]	37
Obr. 14: Světelná intenzita optických vláken	41
Obr. 15: Porovnání světelné intenzity optických vláken Grace a Hypoff	41
Obr. 16: Lineární regrese pro stanovení parametrů Grace 1 mm	42
Obr. 17: Porovnání experimentálních a vyhlazených dat světelné intenzity	44
Obr. 18: Pracovní délka stranově vyzařujících optických vláken typu Hypoff.....	45
Obr. 19: Porovnání světelné intenzity- experimentální data s vyhlazenými daty metodou LLF2	47
Obr. 20: Pracovní délka optických vláken- model LLF2	48
Obr. 21: Pracovní délka stranově vyzařujícím optických vláken typu Hypoff- model LLF2	49
Obr. 22: Porovnání experimentálních dat světelné intenzity s modelem 1 a LLF2- vlákna typu Grace	50
Obr. 23: Porovnání experimentálních dat světelné intenzity s modelem 1 a LLF2- vlákna typu Hypoff	51
Obr. 24: Porovnání parametrů $P(0)$ a $P(0)_{kor}$	51
Obr. 25: Porovnání pracovní délky model 1 a model LLF2- Grace 1 mm.....	52

Obr. 26: Vliv průměru vlákna na intenzitu vyzařování- Grace a Hypoff	54
Obr. 27: Vliv průměru vlákna na intenzitu vyzařování- Flexi a Hypoff	54
Obr. 28: Světelná intenzita optického vlákna Hypoff Ø 1,5 mm v ohybu- Ø kotouče 10 mm	57
Obr. 29: Porovnání světelné intenzity optických vláken v ohybu- kotouč 10 mm.....	58
Obr. 30: Světelná intenzita Hypoff 1 mm při ohybu o kotouče různých průměrů	59
Obr. 31: Světelná intenzita Hypoff 1,2 mm při ohybu o kotouče různých průměrů	59
Obr. 32: Světelná intenzita Hypoff 1,5 mm při ohybu o kotouče různých průměrů	60
Obr. 33: Porovnání světelné intenzity při ohybu o kotouč průměru 20 mm	61
Obr. 34: Porovnání světelné intenzity při ohybu o kotouč průměru 150 mm	61
Obr. 35: Světelná intenzita v závislosti na D/d.....	64
Obr. 36: Světelná intenzita v závislosti na D/d.....	64
Obr. 37: Světelná intenzita v závislosti na D/d- model LLF2 při úhlu ohybu 40°	66
Obr. 38: Světelná intenzita v závislosti na D/d- model LLF2 při úhlu ohybu 90°	66
Obr. 39: Světelná intenzita v závislosti na D/d- model LLF2 při úhlu ohybu 140°	67
Obr. 40: Světelná intenzita v závislosti na D/d- model LLF2 při úhlech ohybu 40°, 90° a 140°	67
Obr. 41: Přístroj měřící světelnou intenzitu optických vláken v napřímeném stavu- POFIN 1	69
Obr. 42: Návrh vozíku odtahového zařízení	70
Obr. 43: Návrh – odtah pomocí stávajícího krokového motoru	71
Obr. 44: Návrh- odtah pomocí navijáku- detail navíjecího kolíku	72
Obr. 45: Návrh- odtah pomocí navijáku	73
Obr. 46: Návrh- odtah pomocí řemenice	74
Obr. 47: Návrh- odtah pomocí ozubeného kola.....	75

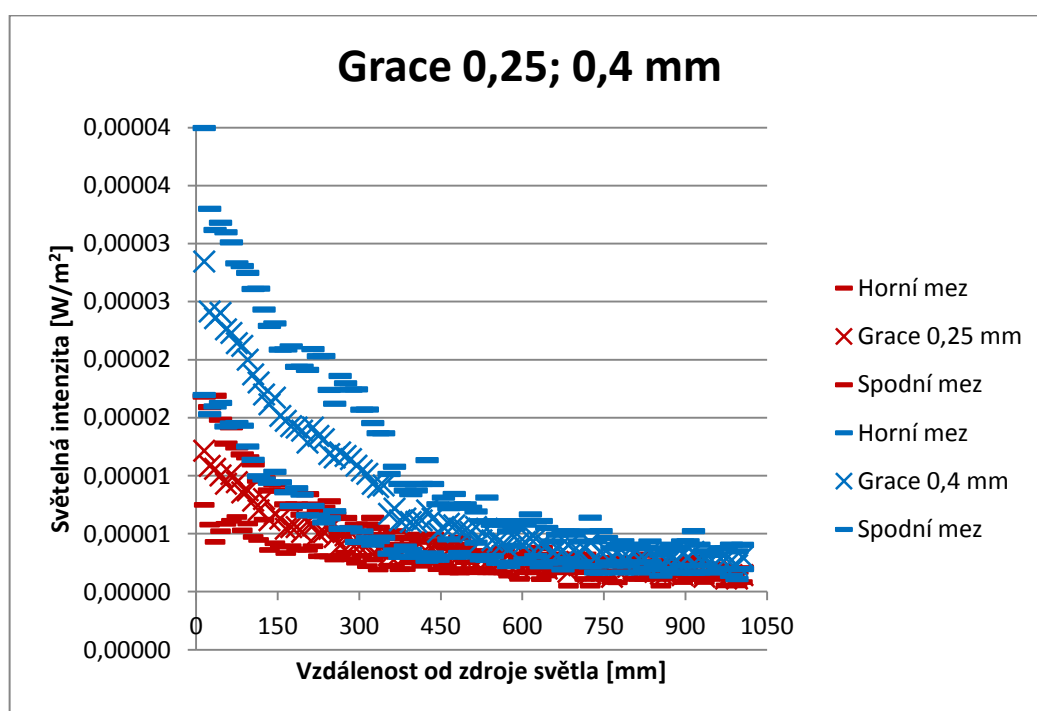
Seznam příloh

Příloha 1	Světelná intenzita vyzařování optických vláken v napřímeném stavu
firmy Grace a Hypoff	I
Příloha 2-	Světelná intenzita vyzařování optických vláken v ohybu firmy Grace a
Hypoff	XX

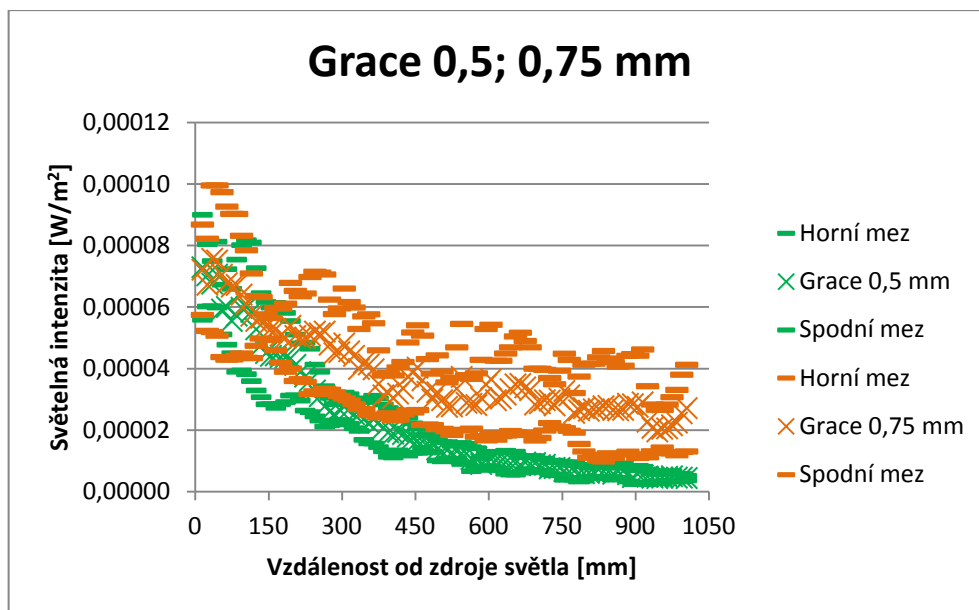
Příloha 1 Světelná intenzita vyzařování optických vláken v napřímeném stavu firmy Grace a Hypoff



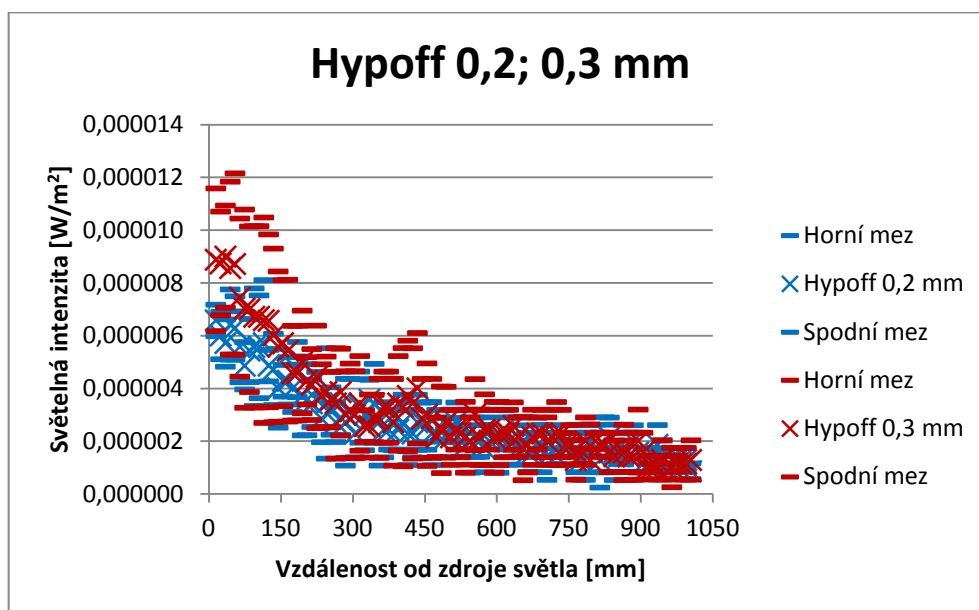
Obr. 48: Světelná intenzita vyzařování optického vlákna typu Flexi \varnothing 2 mm



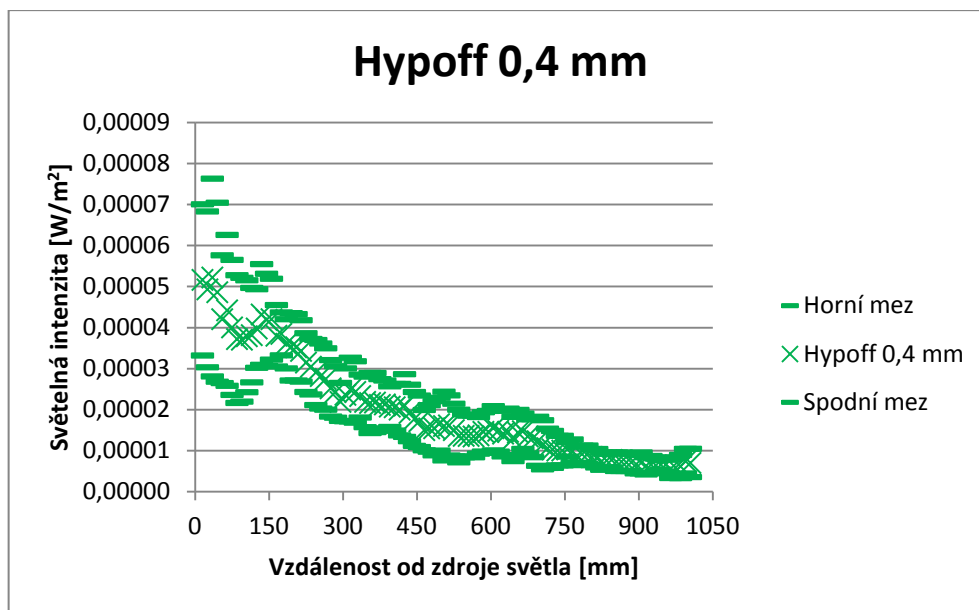
Obr. 49: Světelná intenzita vyzařování optických vláken typu Grace \varnothing 0,25 a
0,4 mm



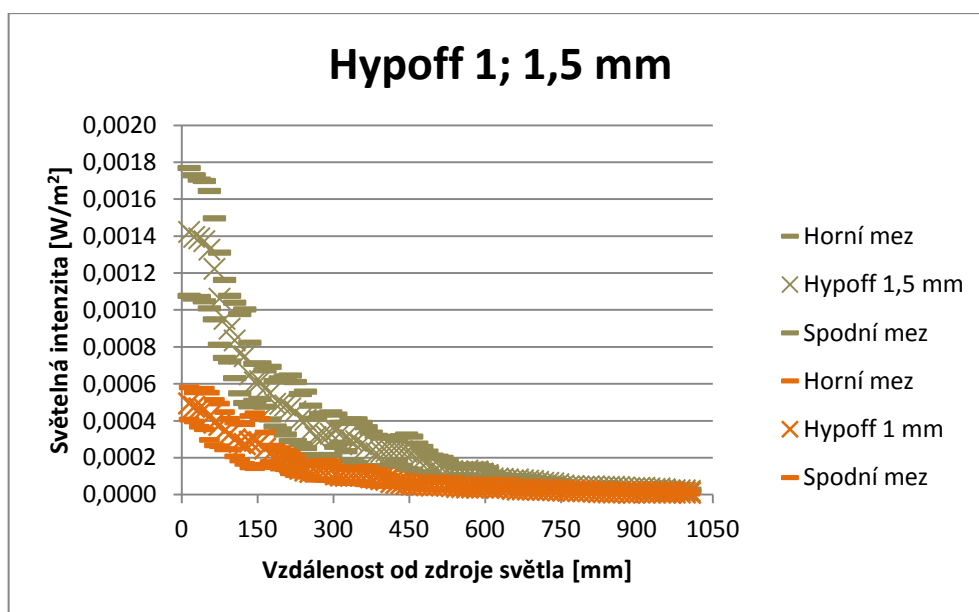
Obr. 50: Světelná intenzita vyzařování optických vláken typu Grace \varnothing 0,5 a 0,75 mm



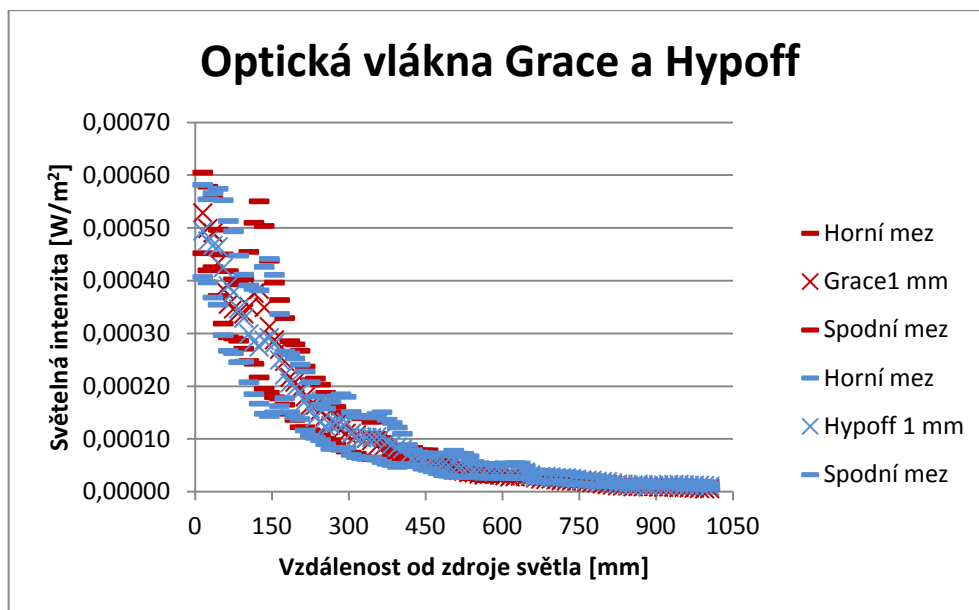
Obr. 51: Světelná intenzita vyzařování optických vláken typu Hypoff \varnothing 0,2 a 0,3 mm



Obr. 52: Světelná intenzita vyzařování optického vlákna typu Hypoff \varnothing 0,4 mm



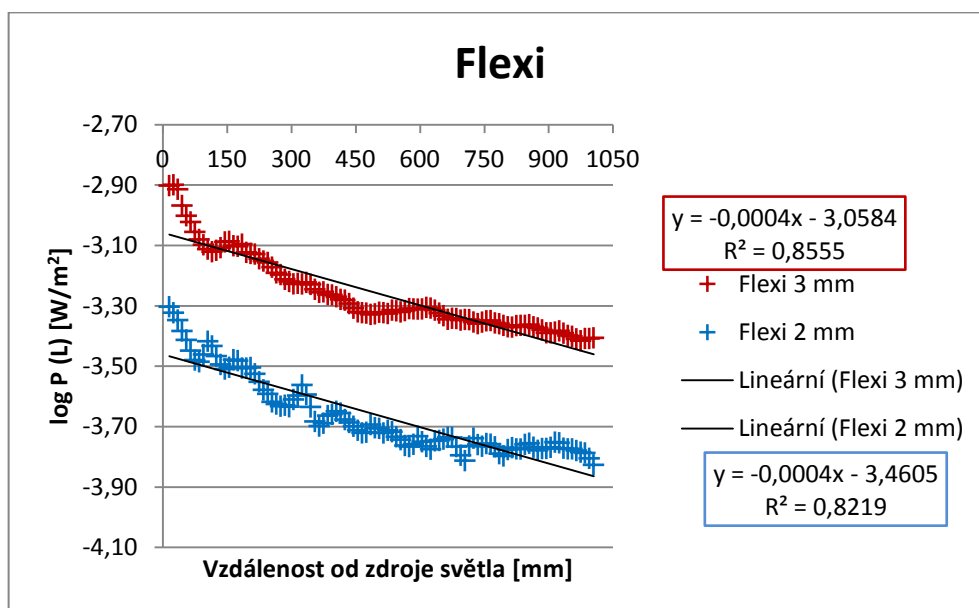
Obr. 53: Světelná intenzita vyzařování optických vláken typu Hypoff \varnothing 1 a 1,5 mm



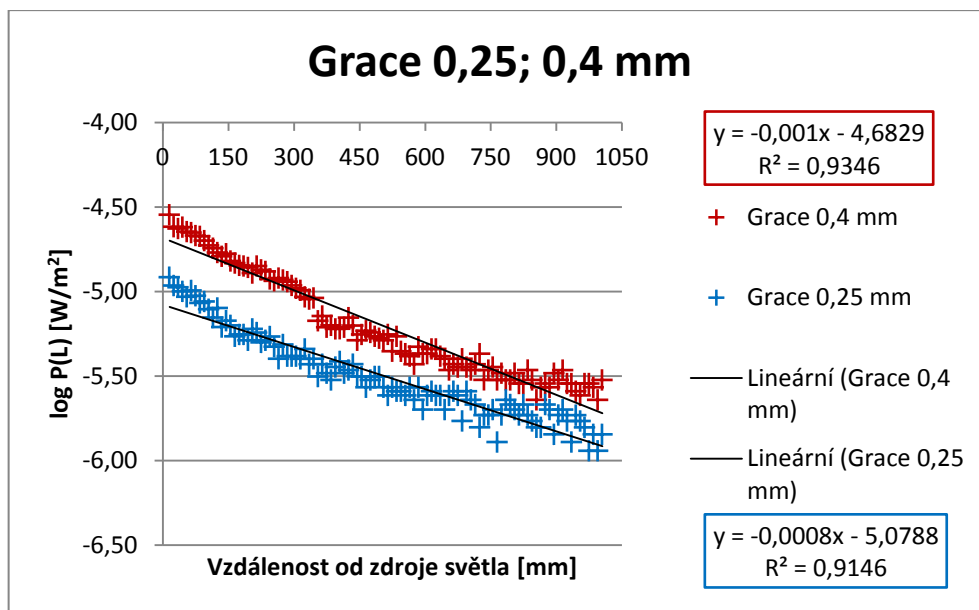
Obr. 54: Optická vlákna Grace a Hypoff \varnothing 0,4 mm

**Světelná intenzita optických vláken v napřímeném stavu- vyhlazení-
model 1**

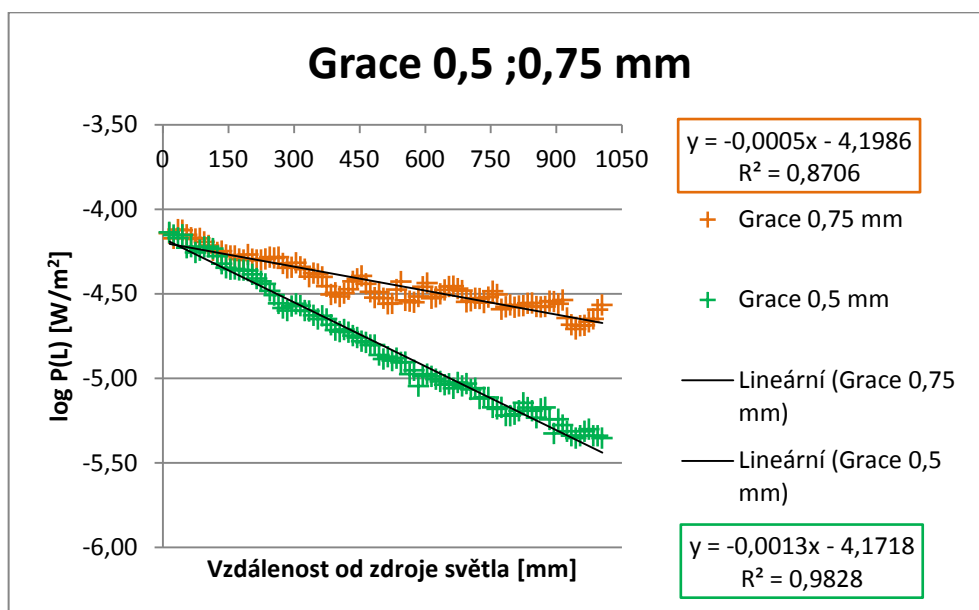
Lineární regrese pro stanovení parametrů



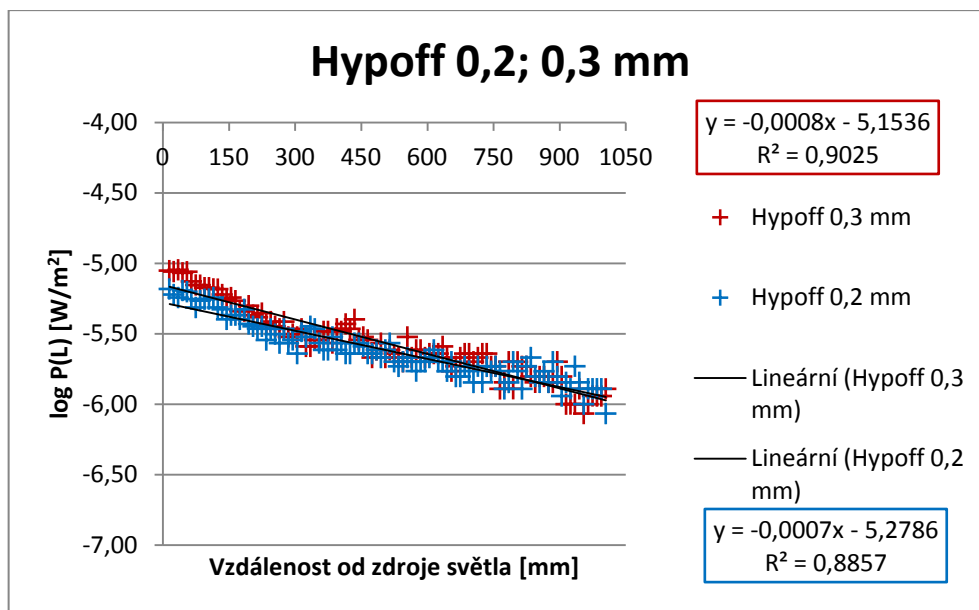
Obr. 55: Lineární regrese pro stanovení parametrů optických vláken typu Flexi



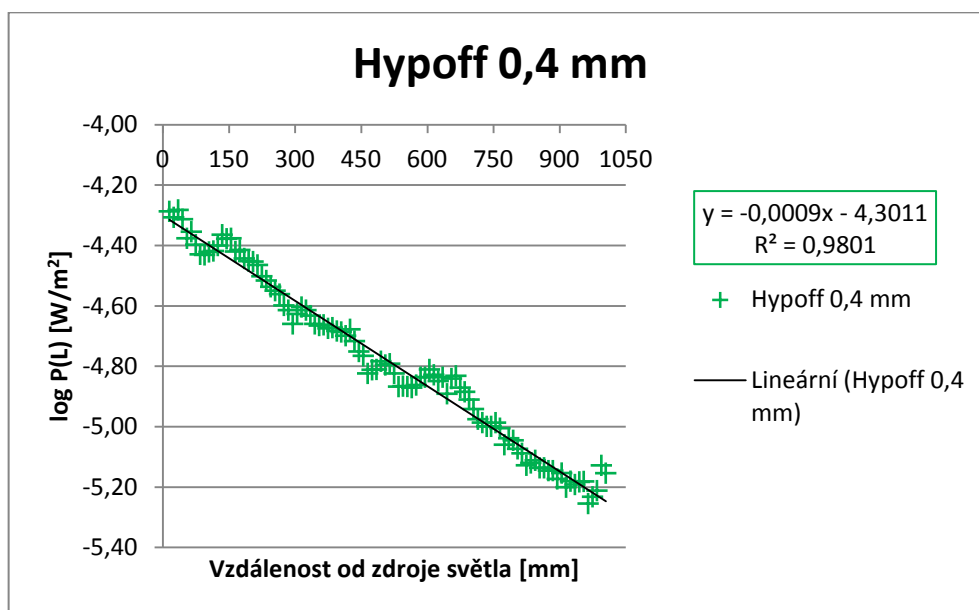
Obr. 56: Lineární regrese pro stanovení parametrů optických vláken typu Grace
 \varnothing 0,25 a 0,4 mm



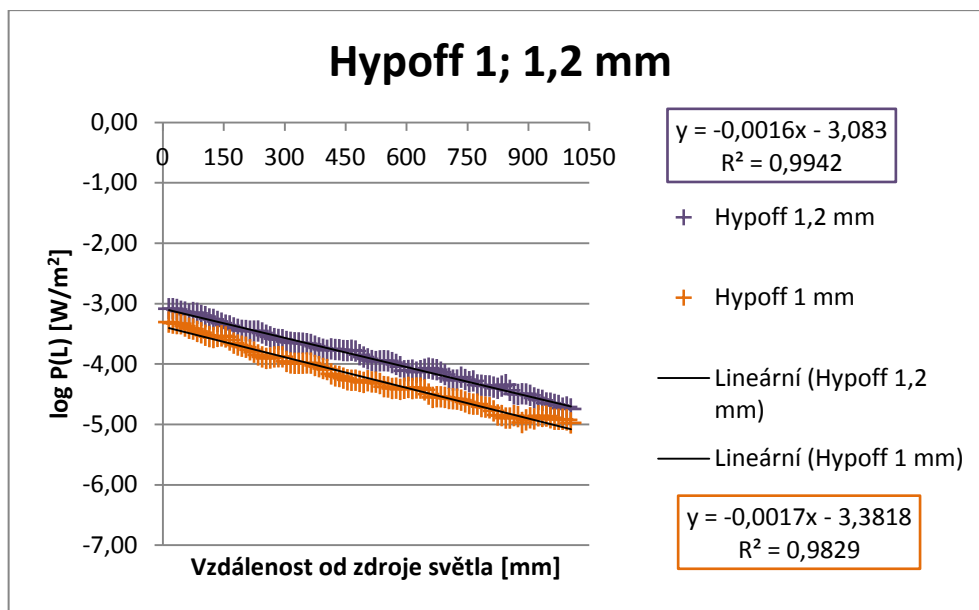
Obr. 57: Lineární regrese pro stanovení parametrů optických vláken typu Grace \varnothing
0,5 a 0,75 mm



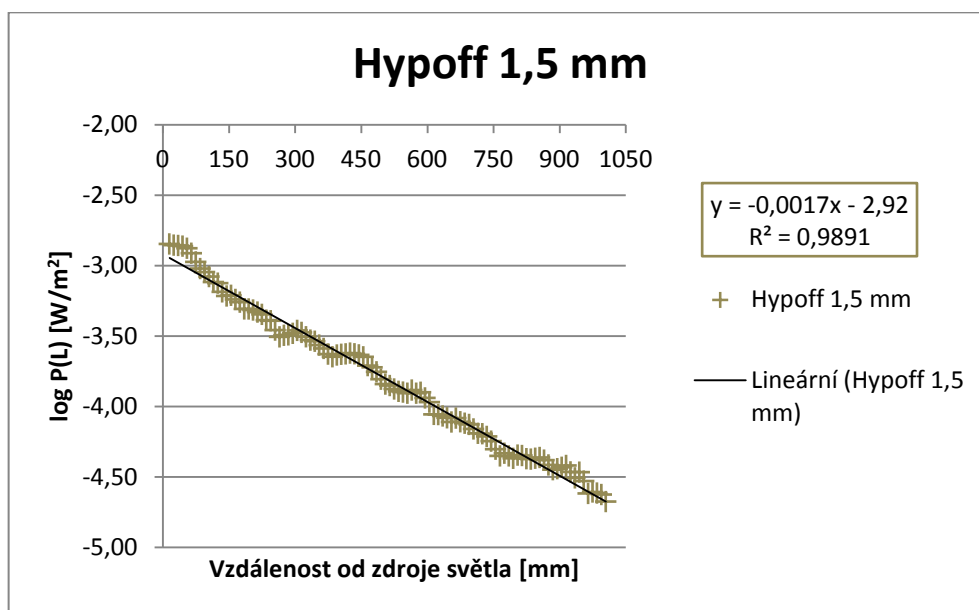
**Obr. 58: Lineární regrese pro stanovení parametrů optických vláken typu Hypoff
Ø 0,2 a 0,3 mm**



**Obr. 59: Lineární regrese pro stanovení parametrů optických vláken typu Hypoff
Ø 0,4 mm**



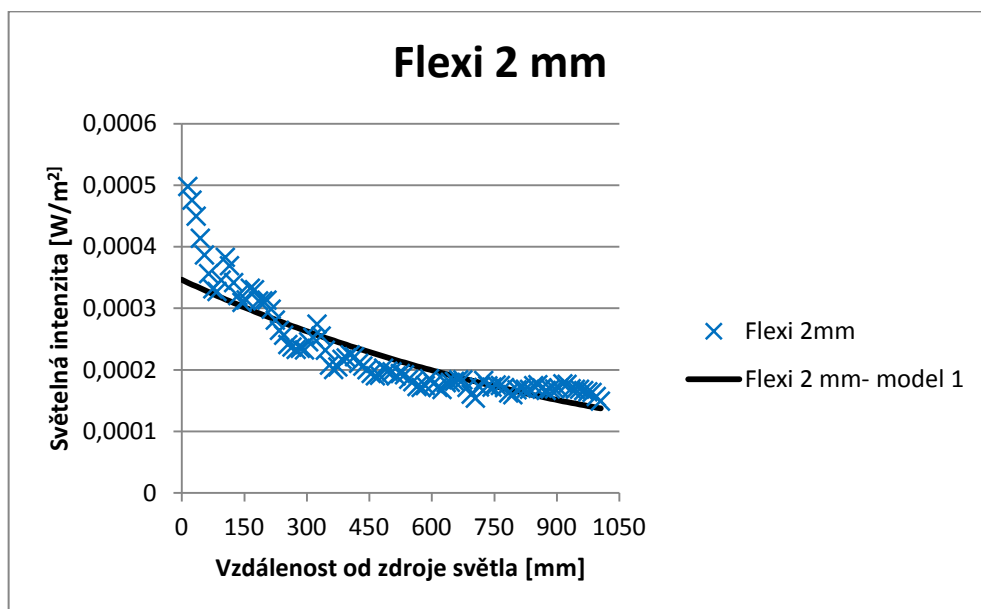
**Obr. 60: Lineární regrese pro stanovení parametrů optických vláken typu Hypoff
Ø 1 a 1,2 mm**



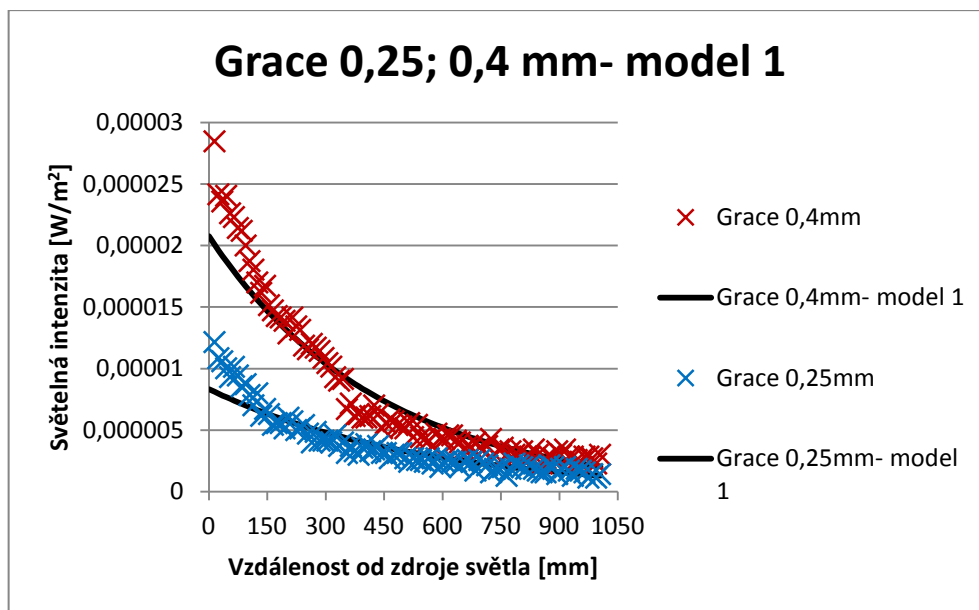
**Obr. 61: Lineární regrese pro stanovení parametrů optických vláken typu Hypoff
Ø 1,5 mm**

Tabulka 7: Parametry $P(0)$ a α_L

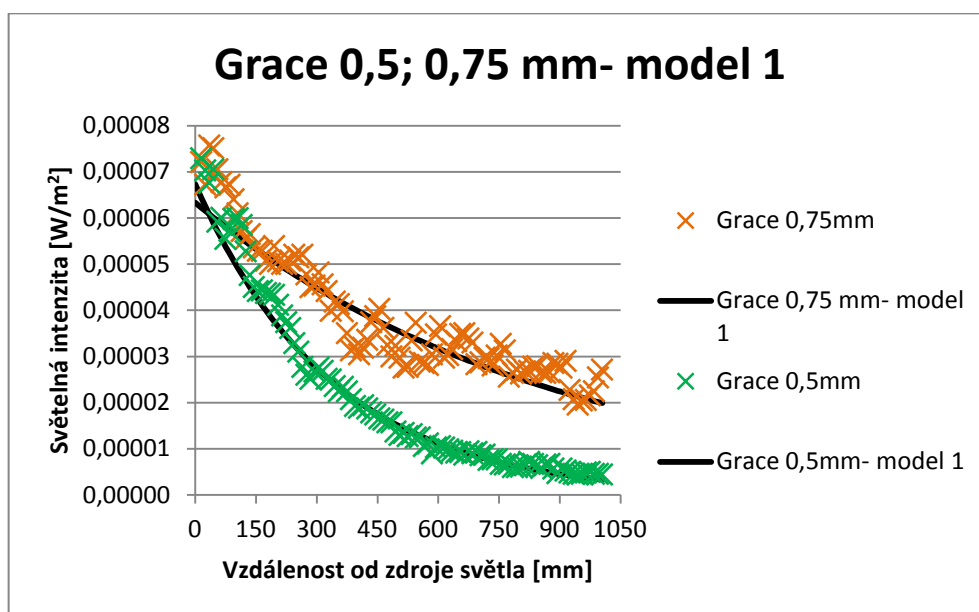
Typ vlákna	Průměr vlákna [mm]	$P(0)$ [W/m ²]	α_L [dB/mm]
Hypoff	0,2	0,00000527	0,007
	0,3	0,00000702	0,008
	0,4	0,00004999	0,009
	1	0,000415	0,017
	1,5	0,0012	0,017
Grace	0,25	0,00000834	0,008
	0,4	0,0000208	0,01
	0,5	0,0000673	0,013
	0,75	0,0000633	0,005
Flexi	2	0,000346	0,004



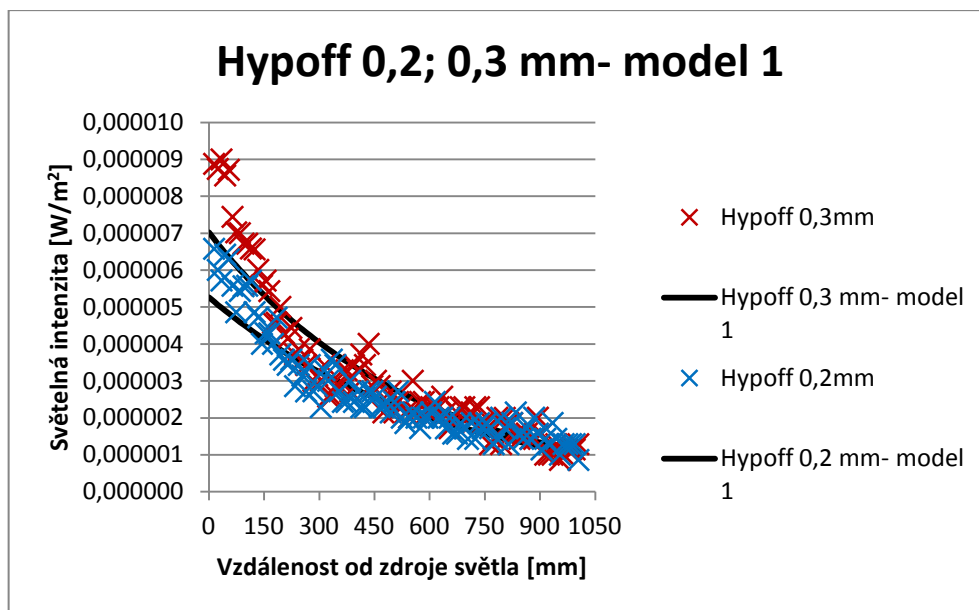
**Obr. 62: Porovnání experimentálních a vyhlazených dat světelné intenzity Flexi
Ø 2 mm**



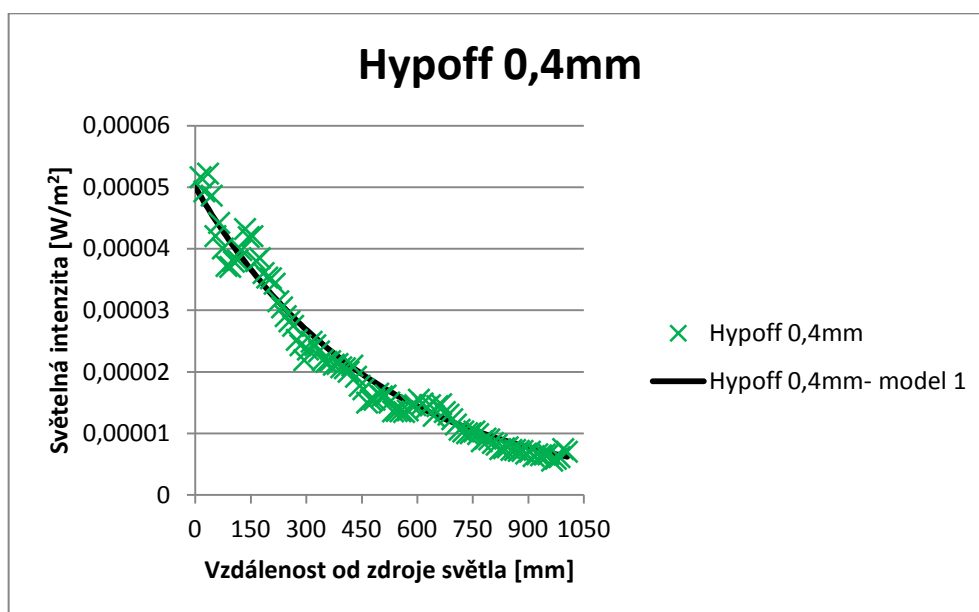
**Obr. 63: Porovnání experimentálních a vyhlazených dat světelné intenzity Grace
Ø 0,25 a 0,4 mm**



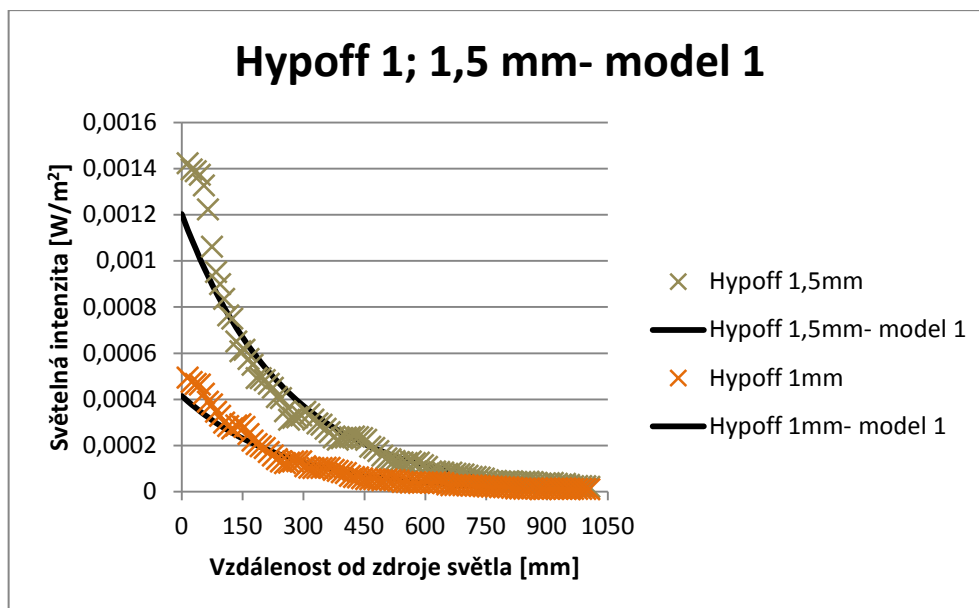
**Obr. 64: Porovnání experimentálních a vyhlazených dat světelné intenzity Grace
Ø 0,5 a 0,75 mm**



Obr. 65: Porovnání experimentálních a vyhlazených dat světelné intenzity Hypoff \varnothing 0,2 a 0,3 mm

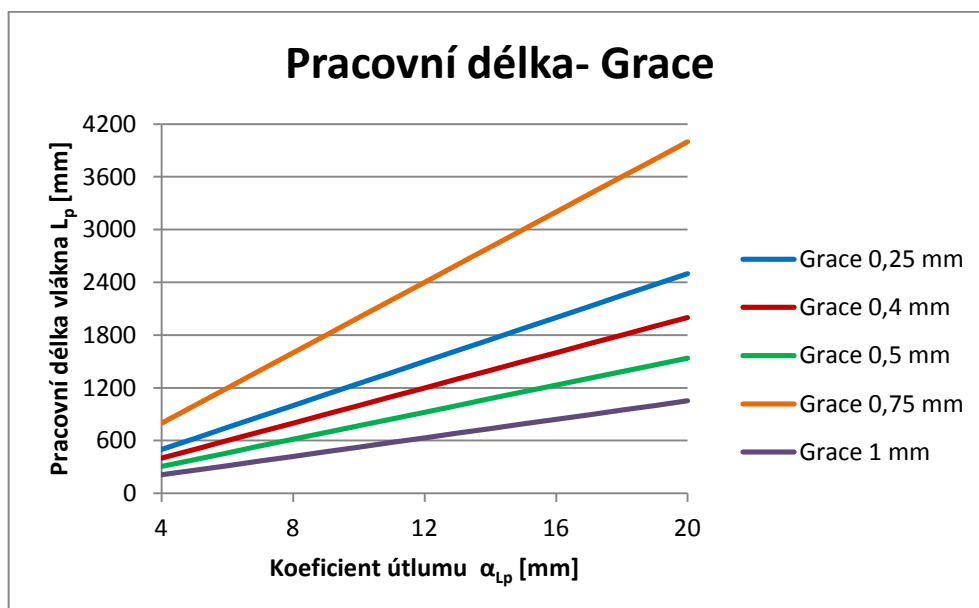


Obr. 66: Porovnání experimentálních a vyhlazených dat světelné intenzity Hypoff \varnothing 0,4 mm

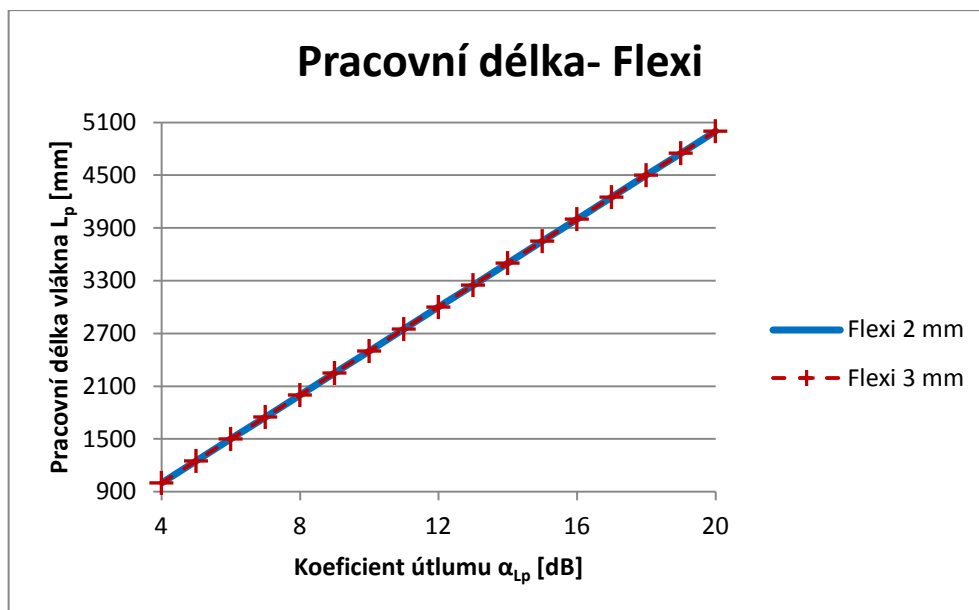


Obr. 67: Porovnání experimentálních a vyhlazených dat světelné intenzity Hypoff \varnothing 1 a 1,2 mm

Pracovní délka optického vlákna- model 1

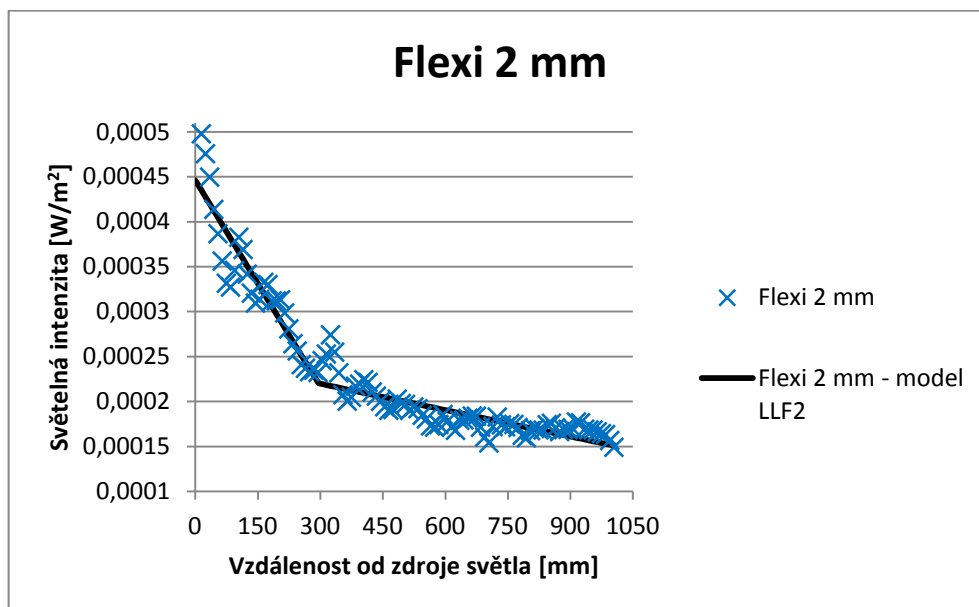


Obr. 68: Pracovní délka stranově vyzařujících optických vláken typu Grace

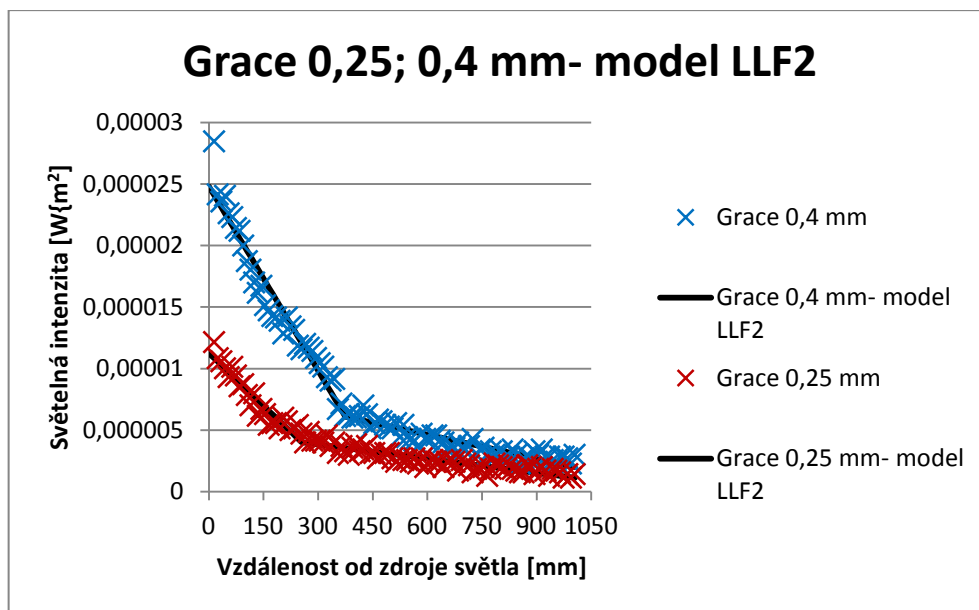


Obr. 69: Pracovní délka stranově vyzařujících optických vláken typu Flexi

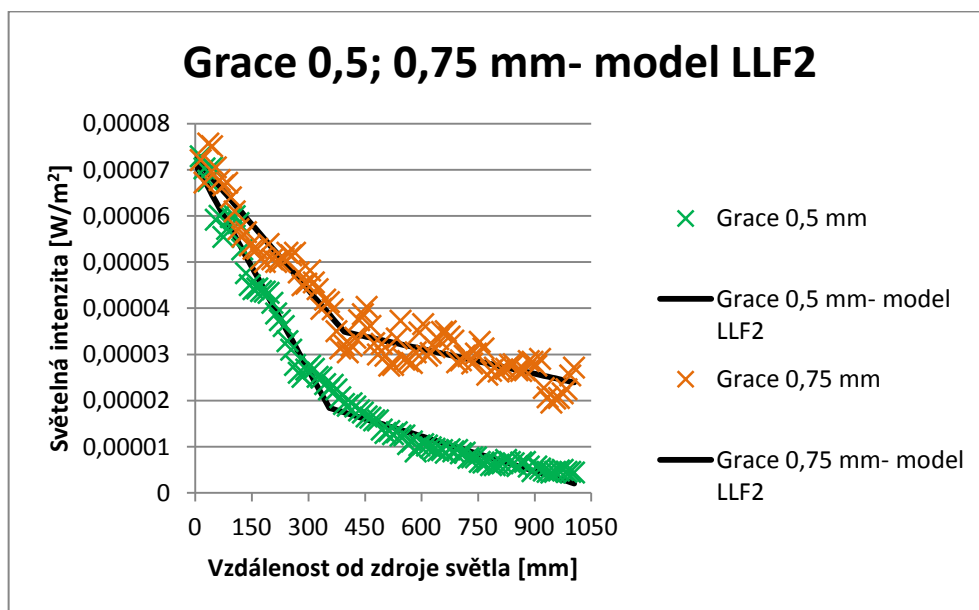
Světelná intenzita optických vláken v napřímeném stavu- vyhlazení- model LLF2



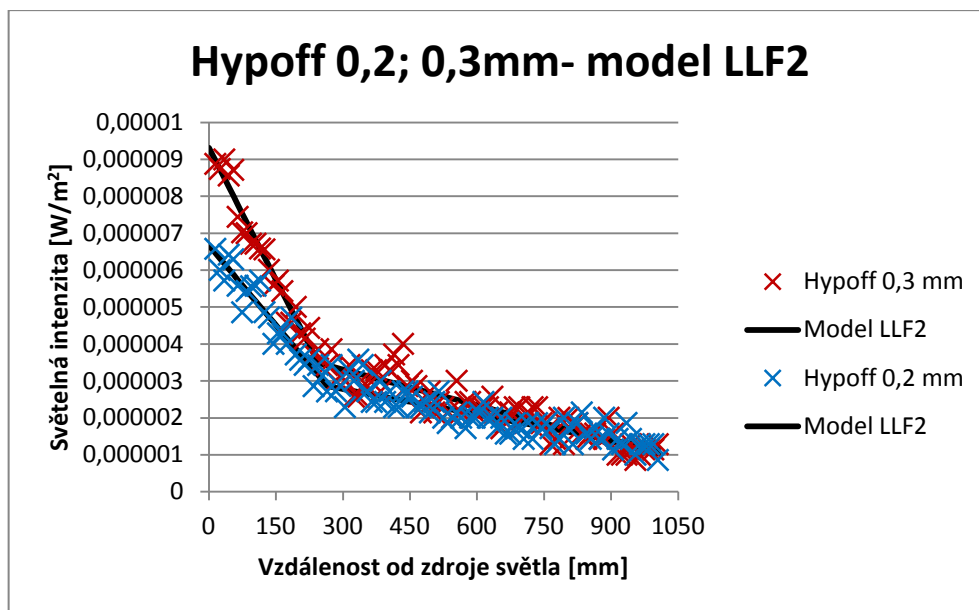
Obr. 70: Porovnání světelné intenzity- experimentální data s vyhlazenými daty
metodou LLF2- Flexi \varnothing 2 mm



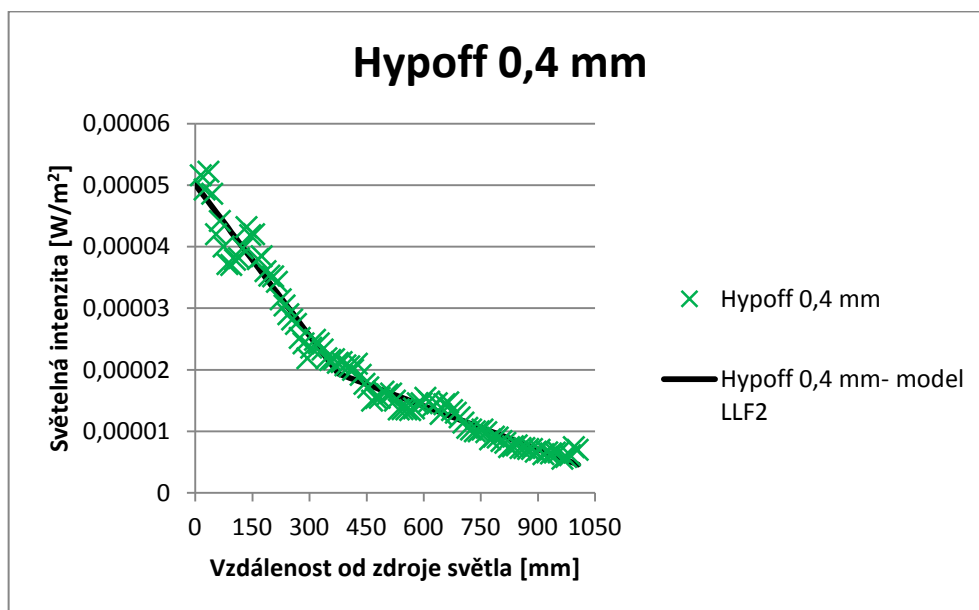
Obr. 71: Porovnání světelné intenzity- experimentální data s vyhlazenými daty metodou LLF2- Grace \varnothing 0,25 a 0,4 mm



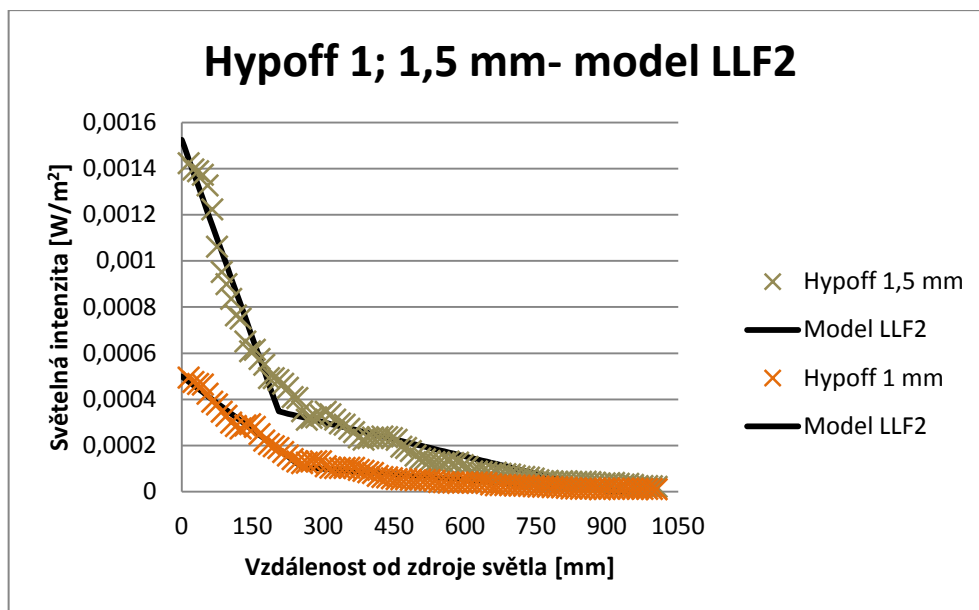
Obr. 72: Porovnání světelné intenzity- experimentální data s vyhlazenými daty metodou LLF2- Grace \varnothing 0,5 a 0,75 mm



Obr. 73: Porovnání světelné intenzity- experimentální data s vyhlazenými daty metodou LLF2- Hypoff \varnothing 0,2 a 0,3 mm

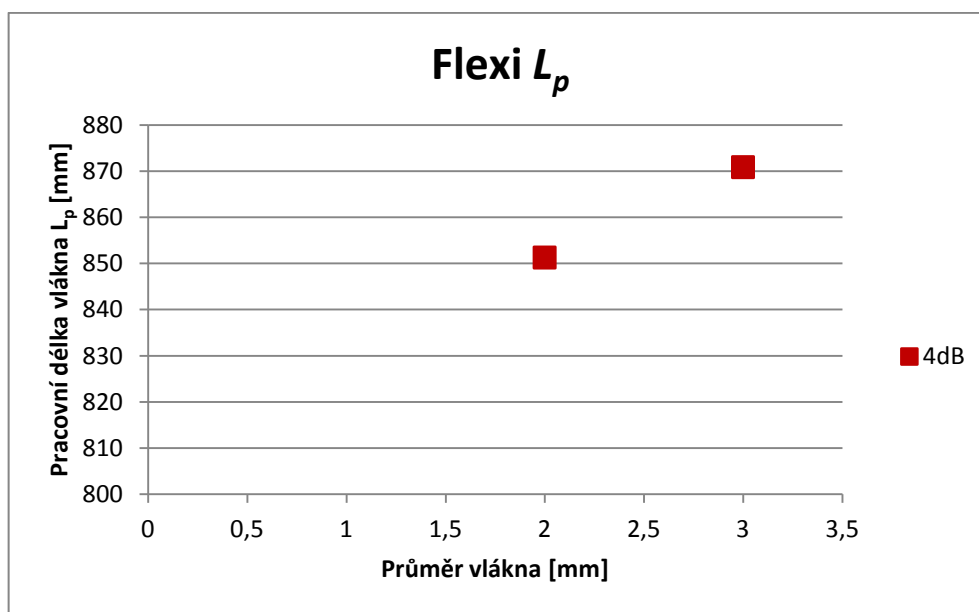


Obr. 74: Porovnání světelné intenzity- experimentální data s vyhlazenými daty metodou LLF2- Hypoff \varnothing 0,4 mm

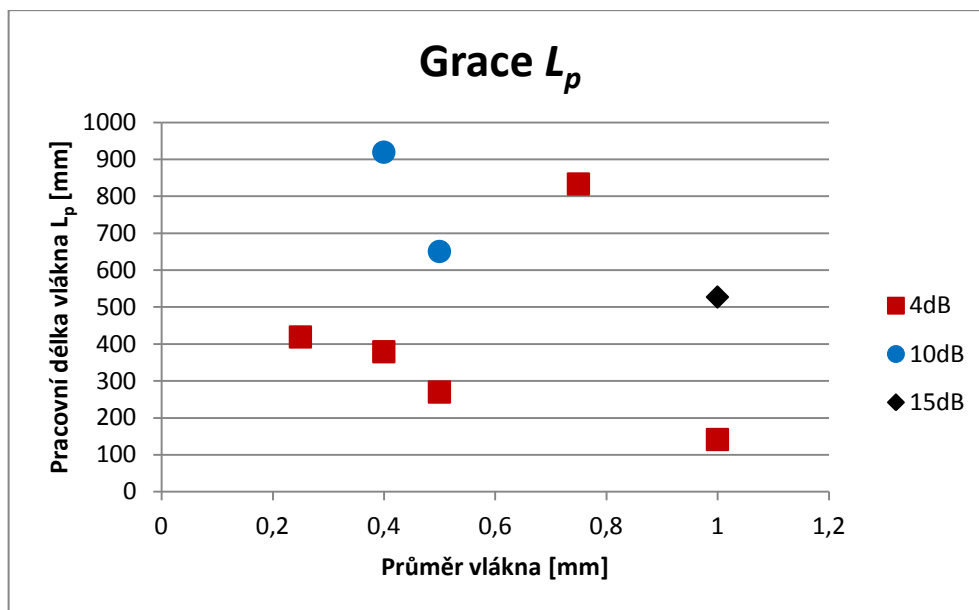


Obr. 75: Porovnání světelné intenzity- experimentální data s vyhlazenými daty metodou LLF2- Hypoff Ø 1 a 1,5 mm

Pracovní délka optického vlákna- model LLF2

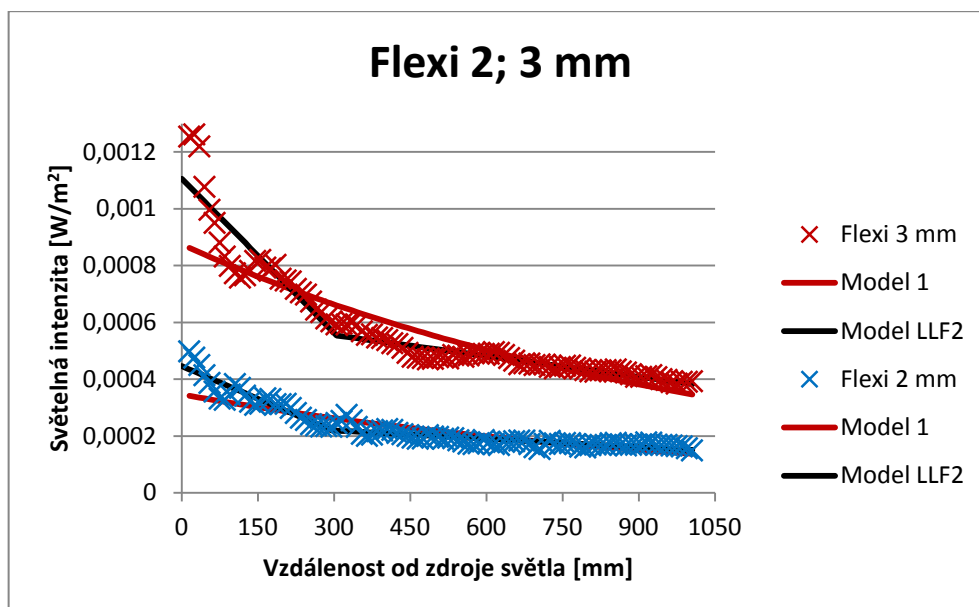


Obr. 76: Pracovní délka optických vláken typu Flexi- model LLF2

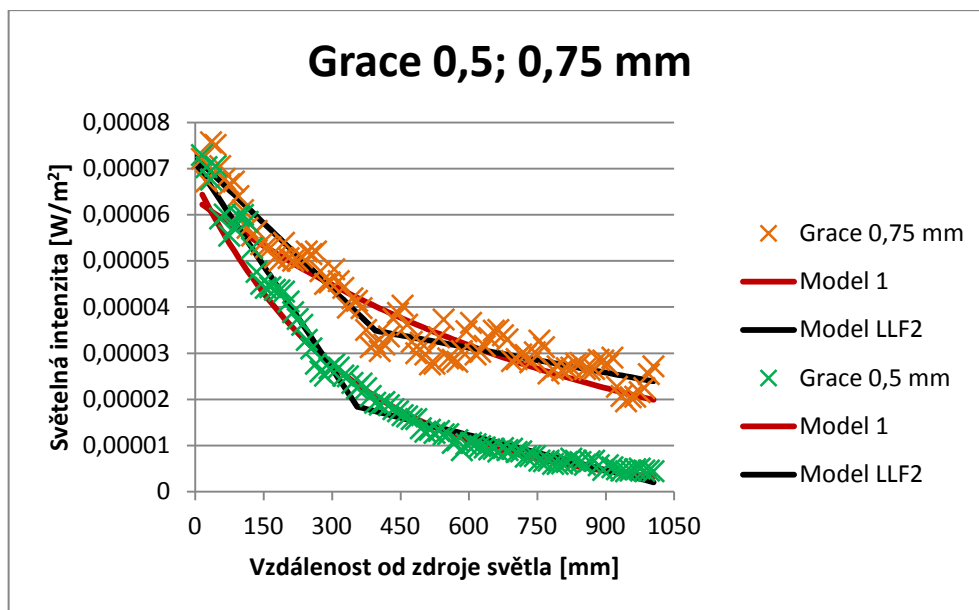


Obr. 77: Pracovní délka optických vláken typu Grace- model LLF2

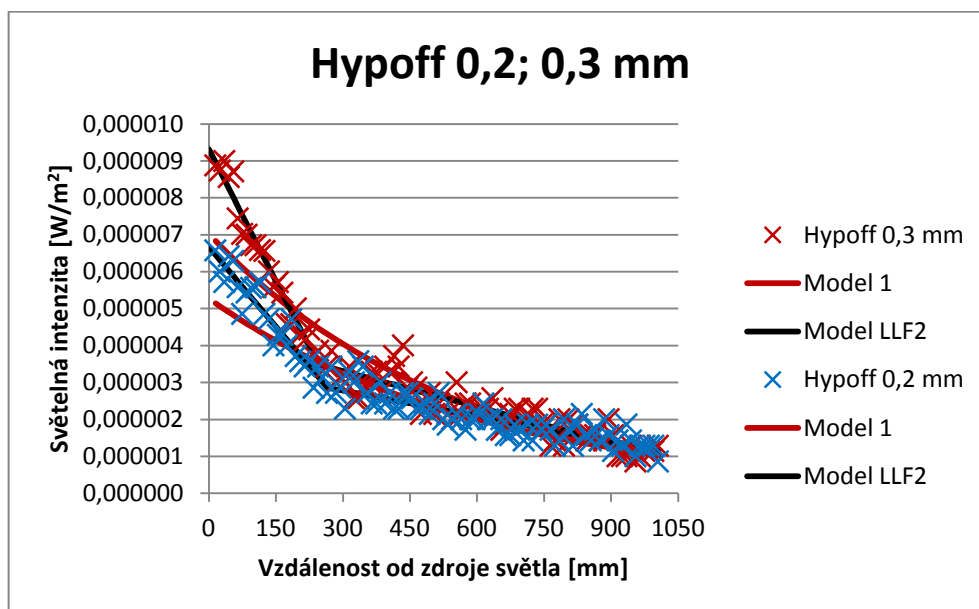
Světelná intenzita optických vláken v napřímeném stavu- porovnání experimentálních dat s metodou 1 a LLF2



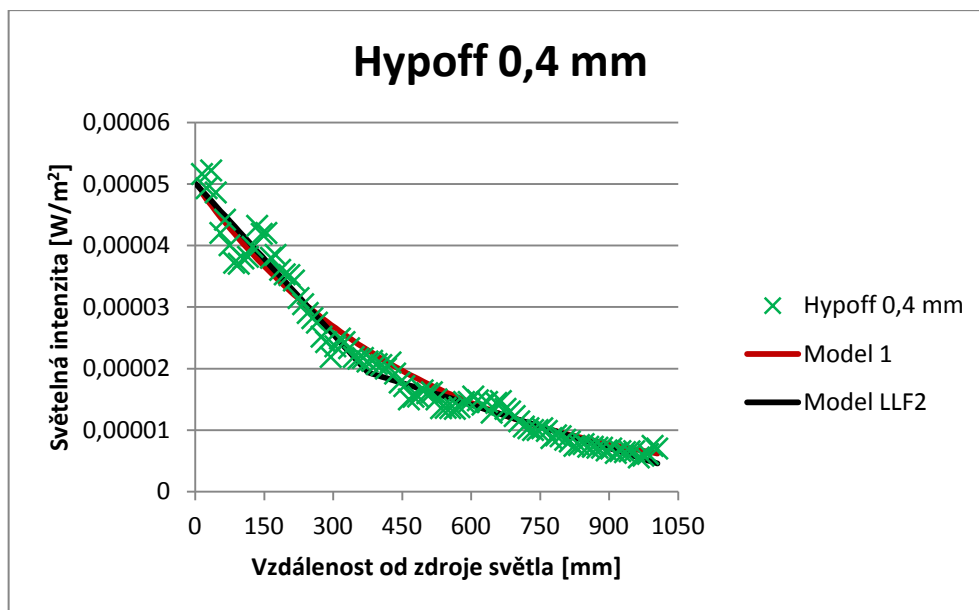
Obr. 78: Flexi \varnothing 2 a 3 mm



Obr. 79: Grace \varnothing 0,5 a 0,75 mm

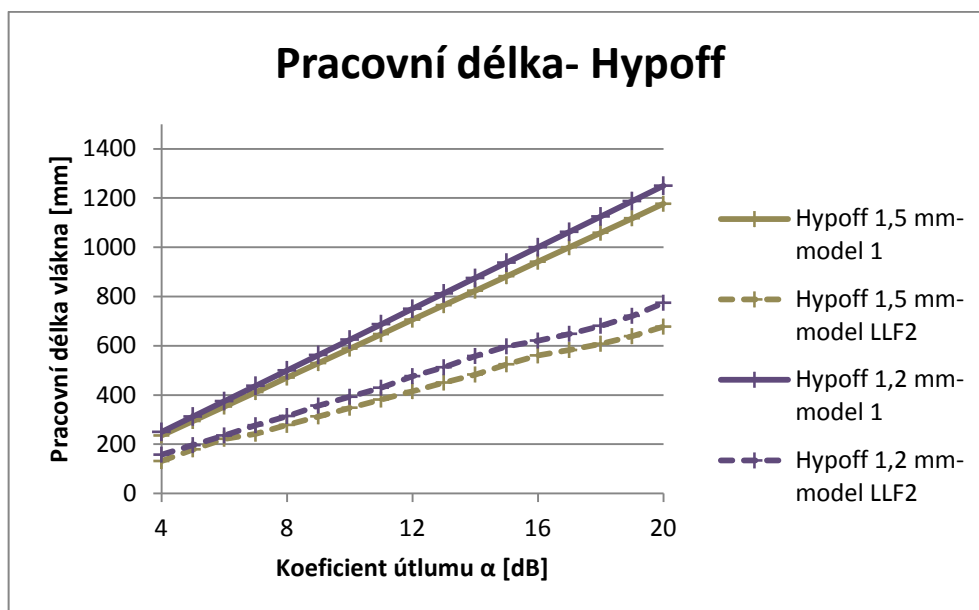


Obr. 80: Hypoff \varnothing 0,2 a 0,3 mm



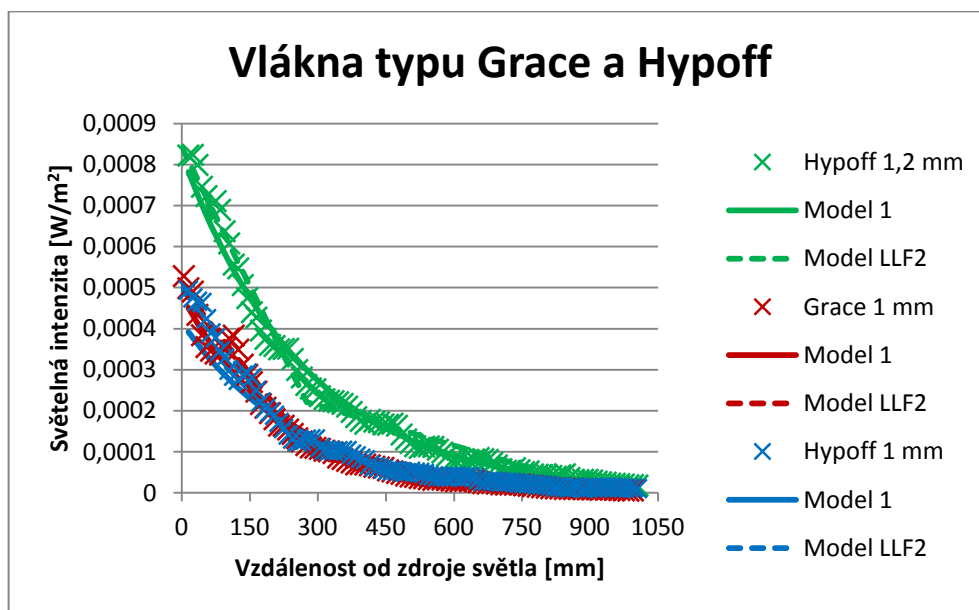
Obr. 81: Hypoff Ø 0,4 mm

Pracovní délka- porovnání model 1 s modelem LLF2- Hypoff



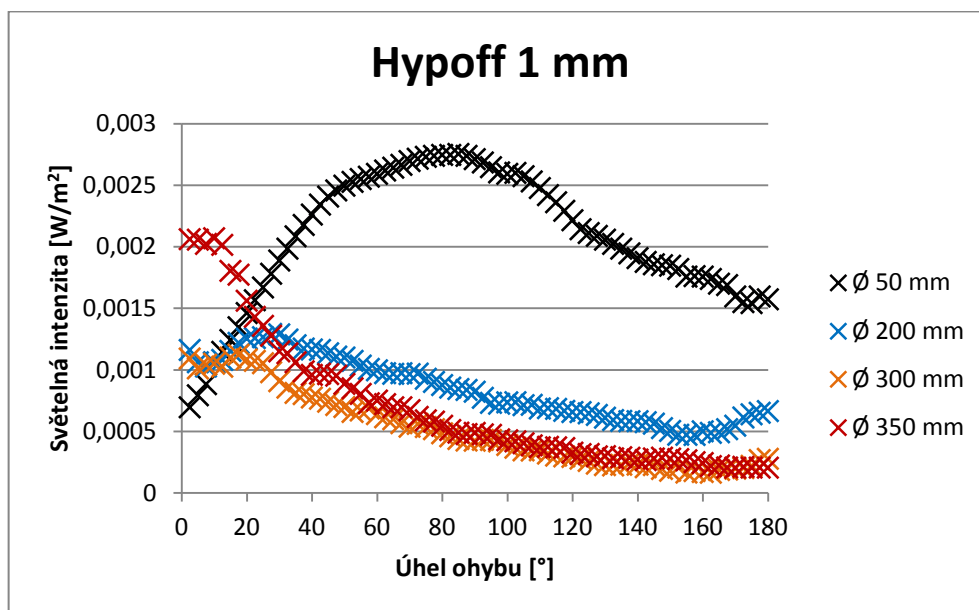
Obr. 82: Hypoff

Vliv průměru vlákna na intenzitu vyzařování

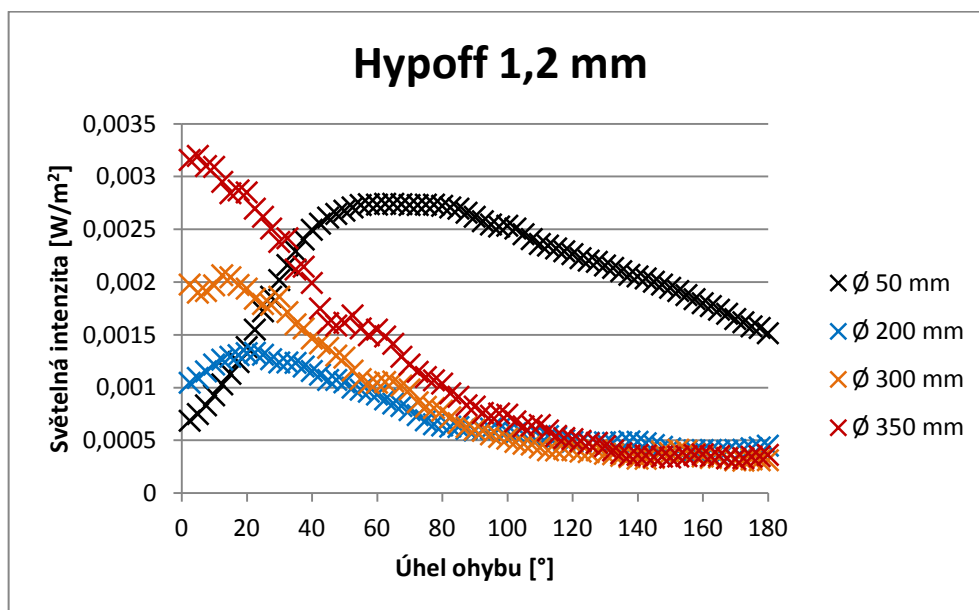


Obr. 83: Vliv průměru vlákna na intenzitu vyzařování

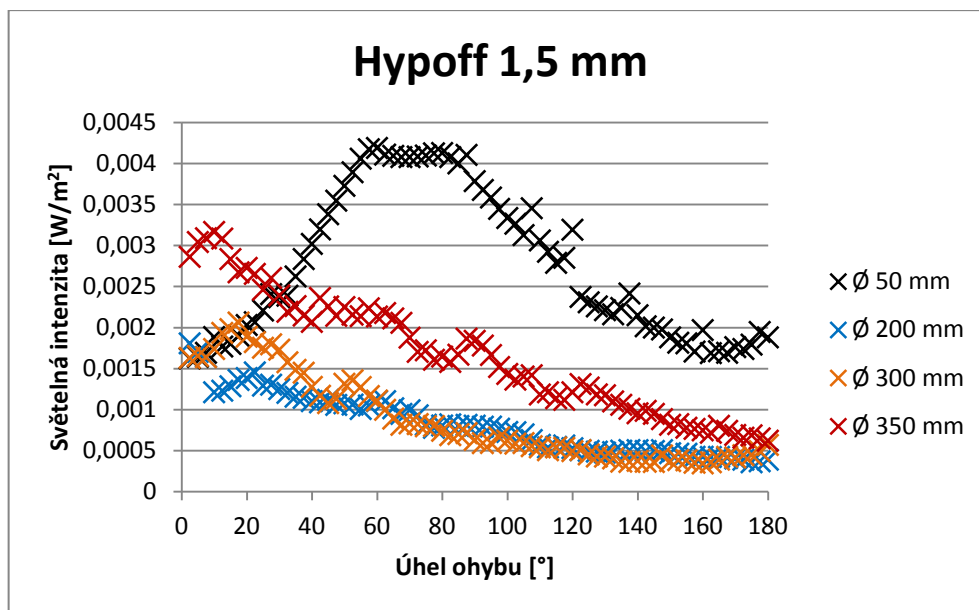
Příloha 2- Světelná intenzita vyzařování optických vláken v ohybu firmy Grace a Hypoff



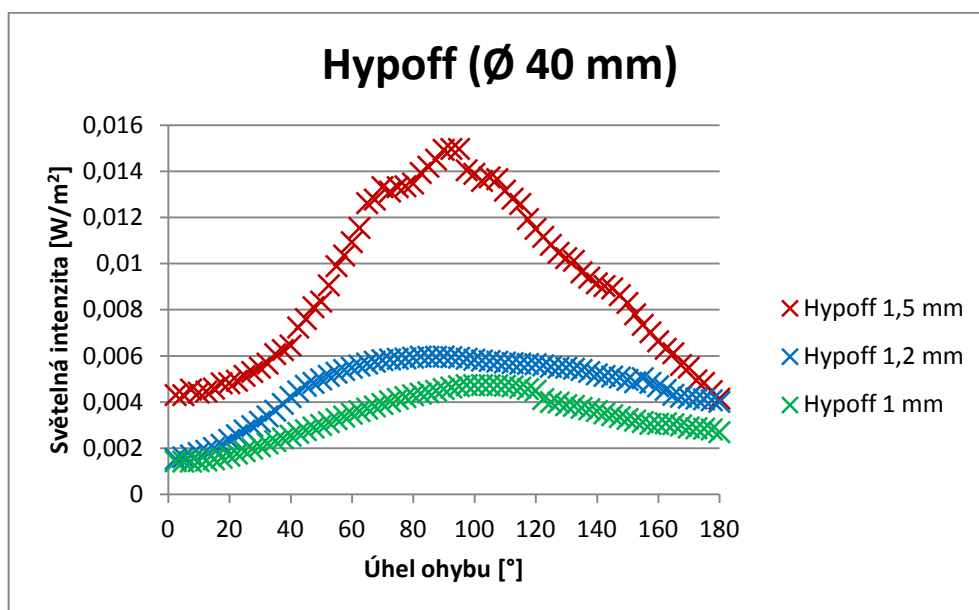
Obr. 84: Světelná intenzita Hypoff 1 mm při ohybu o různé průměry kotouče



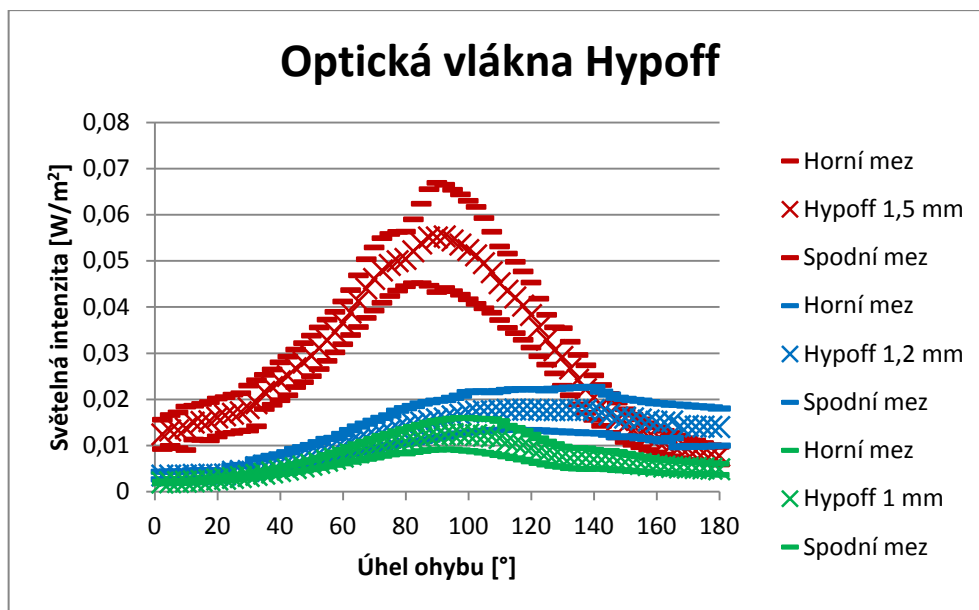
Obr. 85: Světelná intenzita Hypoff 1,2 mm při ohybu o různé průměry kotouče



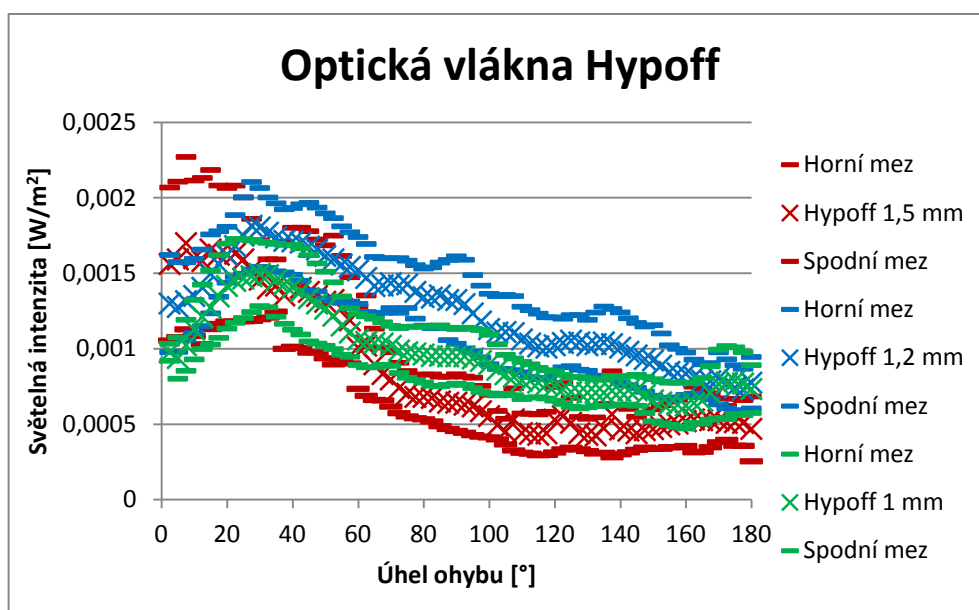
Obr. 86: Světelná intenzita Hypoff 1,5 mm při ohybu o různé průměry kotouče



Obr. 87: Porovnání světelné intenzity při ohybu o kotouč průměru 40 mm

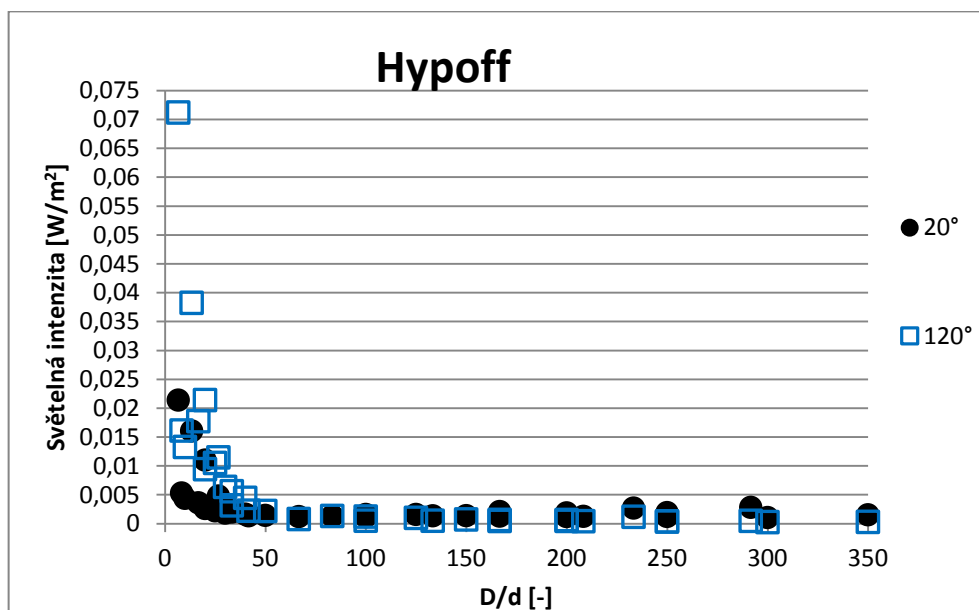


Obr. 88: Statistická významnost světelné intenzity při ohybu o kotouč průměru 20 mm

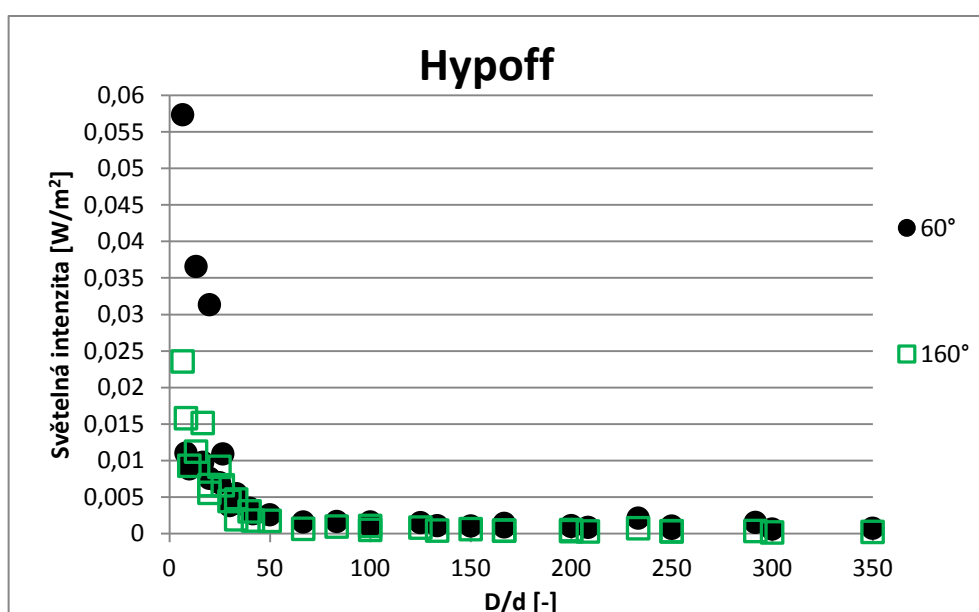


Obr. 89: Statistická významnost světelné intenzity při ohybu o kotouč průměru 150 mm

Vliv podílu průměru vlákna a měřeného kotouče na světelnou intenzitu



Obr. 90: Světelná intenzita v závislosti na podílu D/d při úhlech ohybu 20 a 120°



Obr. 91: Světelná intenzita v závislosti na podílu D/d při úhlech ohybu 60 a 160°